

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE MEDICINA**  
**DEPARTAMENTO DE TOXICOLOGÍA Y LEGISLACIÓN SANITARIA**



**TESIS DOCTORAL**

**Determinación de sexo por volumen óseo en población  
española: un estudio sobre imágenes 3D  
en astrágalo, radio, clavícula y rótula**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA

PRESENTADA POR

**Elena Ruiz Mediavilla**

DIRECTORES

**Bernardo Perea Pérez**  
**Elena Labajo González**

**Madrid, 2018**

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE MEDICINA**

**Departamento de Toxicología y Legislación Sanitaria**



**TESIS DOCTORAL**

**DETERMINACIÓN DE SEXO POR VOLUMEN ÓSEO EN POBLACIÓN  
ESPAÑOLA: UN ESTUDIO SOBRE IMÁGENES 3D  
EN ASTRÁGALO, RADIO, CLAVÍCULA Y RÓTULA**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

**Elena Ruiz Mediavilla**

DIRECTORES

Bernardo Perea Pérez

Elena Labajo González

**Madrid 2017**





**DPTO. TOXICOLOGÍA Y  
LEGISLACIÓN SANITARIA**

Facultad de Medicina  
Pabellón VII – 3ª planta  
Pza. Ramón y Cajal, s/n  
28040 Madrid  
Tlfo.: 91 394 14 67  
Fax: 91 394 16 06  
E-mail: dp089@ucm.es

Con fecha 3 de Abril de 2017 se aprueba la admisión a trámite de la Tesis Doctoral “DETERMINACIÓN DE SEXO POR VOLUMEN ÓSEO EN POBLACIÓN ESPAÑOLA: UN ESTUDIO SOBRE IMÁGENES 3D EN ASTRÁGALO, RADIO, CLAVÍCULA Y RÓTULA” presentada por D<sup>a</sup>. ELENA RUIZ MEDIIVILLA, tras su prelectura el 31/03/2017 en el Departamento de Toxicología y Legislación Sanitaria de la Facultad de Medicina de la UCM.

Consideramos que la presente Tesis Doctoral cumple todos los criterios exigibles para garantizar la calidad de la misma en todos y cada uno de sus apartados:

- Originalidad del tema.
- Relevancia de la temática elegida.
- Adecuada estructura.
- Claridad en la redacción.
- Contempla y desarrolla todos los componentes de un trabajo de investigación.
- Bibliografía adecuada y significativa.
- Relevancia y aporte de los resultados obtenidos.
- Adecuada presentación formal.
- Clara exposición del trabajo (acto de prelectura del 31/03/2017).
- Brillante defensa de los argumentos a las consideraciones de los profesores doctores del Departamento presentes en el acto de la prelectura.

Para que así conste y a los efectos oportunos.

Madrid, a 3 de Abril de 2017

DRA. D<sup>a</sup>. ELENA LABAJO GONZÁLEZ  
Secretaria Académica Dpto.



*A mis padres Luis y Carmen*



## ***AGRADECIMIENTOS***

En primer lugar me gustaría agradecer al Dr. José Antonio Sánchez el haberme permitido hacer las prácticas del máster en su Laboratorio, allí y entonces empecé mi andadura en el apasionante mundo de la Antropología Forense que luego me llevaría a realizar esta tesis. Gracias por tener siempre un hueco para resolver mis dudas.

Agradezco a mis directores de tesis Bernardo y Elena el haberme dado la oportunidad de hacer la tesis con ellos y orientarme en cuanto a la idea y los objetivos de la misma, gracias por tener siempre tiempo para atenderme.

Agradezco al Centro de Cálculo de la Universidad Complutense de Madrid el haberme permitido utilizar el escáner 3D sin el cual no hubiera sido posible realizar esta tesis. En especial agradezco a Amado el haberme enseñado a usar tanto el escáner como su software y a Pedro el estar siempre dispuesto a resolver mis dudas de estadística. Gracias Sara e Isma por compartir esos ratos que han hecho más amenas tantas tardes escaneando huesos. Agradezco a los compañeros del Centro de Domótica Integral de la UPM el haberme iniciado en el complejo mundo de los escáneres 3D y en especial a David por haberme enseñado a usar el software utilizado para el tratamiento de las imágenes.

Agradezco a la Escuela de Medicina Legal el haberme permitido tener acceso a las dos colecciones osteológicas de las cuales obtuve la muestra para poder realizar mi estudio. Con especial cariño agradezco a las técnicas de laboratorio Carmen y Manoli el haberme facilitado el uso de las mismas y el apoyo e interés del Dr. Minaya para que terminara la tesis.

Durante este período he pasado muchas horas en el Instituto Anatómico Forense de Madrid, agradezco a Enrique y a Concha el habérmelo permitido porque es mucho lo que he aprendido con ellos, gracias por esas conversaciones tan divertidas.

Son muchas las personas que he conocido en este trayecto, con las que he compartido momentos y experiencias, en especial agradezco a Andrea su amistad y el intercambio de conocimientos. Igualmente agradezco a todos mis compañeros del Departamento el haber formado parte de este camino y en especial agradezco a Claudia, César, Carlos, David y Ricardo esos consejos de última hora.



En cuanto a mi familia agradezco a mis tías Flor y Meli y a mi prima Sara el haber formado parte de mi aventura madrileña y ser un apoyo, no hubiera sido lo mismo sin vosotras.

He querido dedicar esta tesis a mis padres porque sin ellos nada de esto hubiera sido posible, siempre han sido un apoyo y me han animado a perseguir mis sueños aunque no estuvieran de acuerdo con todas las decisiones que he tomado. No puedo olvidarme de mi hermano Luis que siempre ha sido otro apoyo y la persona que más me hace reír, no hubiera sido lo mismo sin ti.

Durante el tiempo que ha durado la tesis, que ha sido muy largo, he tenido la oportunidad de participar en proyectos de investigación, congresos, trabajar en otras líneas de investigación, entrar a trabajar en la Universidad, dar clases, aprobar una oposición, por todo ello con lo que me quedo es con el camino andado.

Caminante, son tus huellas  
el camino y nada más;  
Caminante, no hay camino,  
se hace camino al andar.

Al andar se hace el camino, y al volver la vista atrás  
se ve la senda que nunca se ha de volver a pisar.

Caminante no hay camino  
sino estelas en la mar

-- Antonio Machado

# *ÍNDICE*

---





<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>9</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
1.1 El astrágalo	18
1.1.1 Desarrollo del astrágalo	18
1.1.2 Anatomía y métrica del astrágalo	19
1.1.3 Dimorfismo sexual del astrágalo	21
1.2 El radio	22
1.2.1 Desarrollo del radio	22
1.2.2 Anatomía y métrica del radio	23
1.2.3 Dimorfismo sexual en el radio	24
1.3 La clavícula	24
1.3.1 Desarrollo de la clavícula	25
1.3.2 Anatomía y métrica de la clavícula	25
1.3.3 Dimorfismo sexual de la clavícula	26
1.4 La rótula	27
1.4.1 Desarrollo de la rótula	27
1.4.2 Anatomía y métrica de la rótula	28
1.4.3 Dimorfismo sexual de la rótula	28
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>31</b>
<b>3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</b>	<b>35</b>
<b>4. MATERIAL Y MÉTODOS</b>	<b>39</b>
4.1 Muestra de estudio	41
4.2 Escaneo de la muestra	41
4.2.1 Escáner láser 3D PICZA LPX-250	41
Exploración de planos	42
Exploración giratoria	43
Limitaciones	43
4.2.2 Digitalización de los huesos	43

Astrágalo	43
Radio	44
Clavícula	44
Rótula	44
4.2.3 Tratamiento de la imagen	44
4.3 Variables estudiadas	44
4.4 Estudio estadístico	47
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>49</b>
5.1 Artículo 1: Determining sex by bone volume from 3D images: discriminating analysis of the tali and radii in a contemporary Spanish Reference Collection	53
Resumen en español	55
Artículo	57
5.2 Artículo 2: Determining sex with the clavicle in a contemporary Spanish Reference Collection: A study on 3D images	81
Resumen en español	83
Artículo	85
5.3 Artículo 3: Sex determination from the patella: A volumetric and metric study on 3D images in two contemporary Spanish reference collections	113
Resumen en español	115
Artículo	117
<b>6. DISCUSIÓN</b>	<b>141</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>151</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>155</b>

# *RESUMEN*

---





## **Introducción**

Uno de los objetivos principales en Antropología Forense es determinar el sexo de los restos que están bajo estudio. No siempre es posible recuperar aquellos restos a partir de los cuales se puede determinar el sexo con una alta fiabilidad, como es el caso de la pelvis o el cráneo, con lo que son necesarios nuevos estudios sobre huesos del esqueleto postcraneal para conocer su poder discriminante. Debido a las diferencias encontradas entre poblaciones, es necesario realizar estudios específicos sobre las diferentes poblaciones con lo cual es necesario conocer la variabilidad en población española. Diferencias en el desarrollo muscular, en el nivel cantidad-calidad ósea y en el nivel de actividad física explicarían parte de las diferencias entre varones y mujeres, existiendo un dimorfismo sexual en la especie humana que permite determinar el sexo a partir de restos óseos, siendo unos huesos más discriminantes que otros. En cuanto a los métodos existentes para determinar el sexo a partir de un resto óseo principalmente se encontrarían dos: el morfológico y el métrico. En el cráneo y en la pelvis son más utilizados los morfológicos y en el resto de los huesos del esqueleto postcraneal los métricos. El estudio del volumen óseo para determinar el sexo no parece haber despertado un gran interés ya que pocos estudios se encuentran que hayan descrito el poder discriminante de esta variable. Quizás esto sea debido a la falta de técnicas fiables para poder calcularlo más que a considerarla una variable que no fuera a discriminar bien el sexo. En los estudios publicados se calculaba el volumen utilizando la técnica de desplazamiento de fluido, presentando el inconveniente de tener que sumergir el hueso en agua, con lo que siendo el hueso poroso parte de ese agua era absorbida por el mismo, no siendo preciso el cálculo de su volumen. Actualmente con los nuevos avances basados en tecnología 3D es posible reproducir el hueso digitalmente y calcular su volumen de forma fiable utilizando herramientas informáticas. Cuatro fueron los huesos del esqueleto postcraneal elegidos para realizar este estudio, pensando en su morfología, tamaño y fácil manipulación para ser digitalizados correctamente, eligiéndolos de entre diferentes regiones anatómicas del cuerpo; astrágalo, radio, clavícula y rótula.

## **Objetivos**

El objetivo principal de esta tesis es analizar el poder discriminante de la variable volumen en astrágalo, radio, clavícula y rótula para determinar el sexo y ofrecer funciones de clasificación que puedan ser aplicadas sobre población española. Los objetivos específicos propuestos en esta tesis son los que siguen:



1. Comprobar que se puede digitalizar cada uno de los huesos y obtener una reproducción fidedigna del original.
2. Comprobar que se pueden tomar medidas en las reproducciones 3D del hueso de forma fiable.
3. Comprobar que se puede calcular el volumen total del hueso y el volumen de las regiones anatómicas seleccionadas.
4. Comprobar el poder discriminante de las variables volumétricas para determinar el sexo en la muestra de estudio.
5. Obtener funciones de clasificación que puedan aplicarse sobre población española para determinar el sexo de los restos objeto de estudio.
6. Comprobar las diferencias según el lado.
7. Comprobar que dichas funciones se pueden aplicar sobre una muestra de población española mediante pruebas de validación.

### **Material y métodos**

La muestra utilizada para el presente estudio proviene de dos colecciones de referencia españolas contemporáneas situadas en la Escuela de Medicina Legal de Madrid ubicada en la Facultad de Medicina de la Universidad Complutense de Madrid. La primera colección EML1 está compuesta por 132 individuos nacidos en diferentes regiones de España, entre los años 1881 y 1973 y que murieron entre los años 1975 y 1985. La segunda colección EML2 está formada por 88 individuos nacidos entre 1941 y 1976 y cuya fecha de defunción es 1996. Durante el período en el que se realizó el primer estudio en astrágalo y radio la segunda colección estaba en proceso de limpieza con lo que el estudio se realizó utilizando la primera colección y los pocos huesos que se pudieron recuperar de la segunda colección se utilizaron para la prueba de validación. En total la muestra de estudio se compone de los astrágalos de 98 individuos, los radios de 77 individuos, las clavículas de 100 individuos y las rótulas de 134 individuos.

Una vez recuperados los huesos objeto de estudio, teniendo en cuenta que solo se seleccionaron aquellos que se encontraban en buen estado de conservación y descartando aquellos que presentaban alteraciones tafonómicas o patológicas, se procedió a su escaneo 3D. Para esta tarea se utilizó el 3D Picza Laser Scanner el cual se encontraba disponible en el Centro de Cálculo de la Universidad Complutense de Madrid. El funcionamiento de este escáner se basa en la proyección de un rayo láser que explora la superficie del objeto,

pudiendo seleccionar la distancia entre puntos. Para el presente estudio la distancia óptima entre puntos en relación calidad-tiempo fue de 0.4 mm. Dependiendo de la morfología del hueso, el tipo y la cantidad de escaneos serán distintos. Los dos tipos de escaneos posibles son el escaneo rotatorio y el escaneo de planos. Para escanear el astrágalo y la rótula fueron necesarios dos escaneos rotatorios y un escaneo de planos. Para el radio y la clavícula fueron necesarios seis escaneos de plano. Una vez obtenidos los escaneos de las diferentes orientaciones se utilizó el programa Pixform para unir y fusionar las diferentes orientaciones teniendo que encontrar un mínimo de tres puntos en común para poder unir dos orientaciones. Una vez obtenida la imagen completa es necesario tratarla, consistiendo ese tratamiento en limpiar la imagen, rellenar los agujeros y suavizar la superficie, todo ello utilizando el software Geomagic. Una vez finalizado este proceso ya se pudo realizar la toma de medidas. En total se calcularon 5 variables volumétricas en astrágalo, 4 en radio, 4 en clavícula y 5 en rótula, además de 6 variables métricas tanto en clavícula como en rótula. Todas las medidas se tomaron dos veces con un intervalo de tiempo de dos meses. Además para comprobar las diferencias que existían entre las medidas tomadas sobre el hueso seco y su reproducción 3D se midieron 3 variables métricas sobre hueso seco en clavícula y 2 variables métricas en rótula, las cuales también se midieron 2 veces con un intervalo de tiempo de dos meses. Una muestra de 20 individuos de cada uno de los huesos fue medida también por un segundo observador, tomando las medidas dos veces. Para el estudio estadístico se utilizó el paquete PASW Statistics 18 creando una base de datos que contenía el valor de todas las variables separándolos por sexo y lado. La prueba de Kolmogorov-Smirnov se realizó para estudiar la distribución de la muestra. Se realizó un estudio estadístico que mostraba los valores medios de cada una de las variables y su desviación estándar. Se realizaron varias pruebas *t*-student para muestras pareadas y comprobar si habían diferencias estadísticamente significativas entre las dos tomas de medidas, entre las medidas tomadas sobre la imagen 3D y las tomadas sobre el hueso seco y para comprobar si había diferencias según el lado. En el caso de la clavícula y la rótula cuya muestra de estudio proviene de ambas colecciones se realizó una prueba *t*-student para muestras independientes para comprobar si existían diferencias estadísticamente significativas entre ambas colecciones. Se realizó una prueba *t*-student para muestras independientes para comprobar si había diferencias estadísticamente significativas entre ambos sexos y realizar entonces un análisis discriminante consistente en obtener funciones e intervalos de clasificación de cada una de las variables. Finalmente se realizó una prueba de validación aplicando las fórmulas obtenidas para cada una de las variables de los diferentes huesos sobre una muestra de 20 individuos.

## **Resultados**

En todos los casos los resultados obtenidos en la prueba de Kolmogorov-Smirnov ( $p > 0.05$ ) hicieron rechazar la hipótesis que la muestra no seguía una distribución normal con lo que se desarrollaron tests paramétricos. Los resultados de las pruebas *t*-student para muestras pareadas revelaron que no había diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ) entre las dos medidas tomadas sobre el hueso, sobre la imagen 3D, ni tampoco entre ambas con lo que se pudo continuar el estudio estadístico utilizando las medidas sobre la imagen 3D. De las dos medidas tomadas sobre la imagen 3D se realizó una media para minimizar errores. En ninguno de los casos se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ) entre las dos medidas tomadas por un segundo observador ni las de este con las anteriormente obtenidas con lo que quedó confirmada la fiabilidad de la toma de medidas. En cuanto a los resultados obtenidos para las diferencias según el lado los resultados son variados y se exponen para cada caso. Tanto en radio como en clavícula se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) para el volumen total, no así en astrágalo ni rótula. Estos dos últimos apenas muestran asimetría según el lado, mostrando el radio y la clavícula una mayor asimetría en general, siendo los valores del lateral derecho mayores que el izquierdo, a excepción de la longitud máxima de la clavícula. En todos los huesos se encontraron diferencias estadísticamente significativas según el sexo, siendo siempre los valores mayores en el varón para todas las variables. Para el astrágalo se obtuvieron mejores porcentajes de clasificación con el astrágalo izquierdo, siendo el volumen total la mejor variable clasificatoria, clasificando correctamente el 90.9% de la muestra. Para el radio se obtuvieron mejores porcentajes de clasificación con el lateral derecho, clasificando correctamente el 96.9% de la muestra con el volumen de la diáfisis. Para la clavícula, aunque no se cumple para todas las variables, se suelen obtener mejores resultados con la clavícula derecha, siendo el volumen de la diáfisis la que mejor clasifica con una 94% de aciertos. Los mejores resultados se consiguieron con la combinación de variables métricas y volumétricas alcanzando el 96% de aciertos. Para la rótula mayoritariamente se obtuvieron mejores resultados también con el lateral derecho siendo la variable más dimórfica el volumen total consiguiendo clasificar correctamente el 82.4% de la muestra. El mejor resultado de clasificación se obtuvo con una combinación de variables métricas y volumétricas alcanzando el 86.5% de aciertos. Las pruebas de validación confirman los resultados obtenidos en el análisis discriminante llegando a clasificar correctamente el 90% de la muestra en astrágalo, el 95% en radio, el 100% en clavícula y el 93.3% en rótula.

### **Conclusiones**

1. Se ha conseguido digitalizar los huesos y obtener una reproducción fidedigna de los mismos, pudiendo medir y calcular variables sobre los mismos de una forma fiable.
2. Con la variable volumen total se ha llegado a discriminar correctamente el 90.9% de la muestra a partir del astrágalo izquierdo, el 93.9% a partir del radio derecho, el 92% a partir de la clavícula derecha y el 82.4% a partir de la rótula derecha.
3. En astrágalo y rótula ha sido el volumen total el que presentaba un mayor poder discriminante, no así en radio y clavícula donde el volumen de la diáfisis derecha ha conseguido los mayores porcentajes de correcta clasificación; 96.9% y 94% respectivamente.
4. Astrágalo y rótula apenas han mostrado diferencias en cuanto al lado, mostrando una mayor asimetría el radio y la clavícula, siendo mayores los valores obtenidos en el lado derecho, a excepción de la longitud máxima de la clavícula.
5. La prueba de validación confirma los resultados del análisis discriminante pudiendo aplicar las fórmulas obtenidas sobre población española de forma fiable.



# *ABSTRACT*

---





## **Introduction**

One of the main objectives in Forensic Anthropology is to determine the sex of the remains under study. It is not always possible to recover the remains which determine the sex with a high reliability, as pelvis or cranium, so new studies over the postcranial skeleton are necessary to discover its discriminant power. Due to the differences found between populations it is necessary to perform specific studies over them, so the variability of the Spanish population also need to be studied. Differences in the muscular development, the quantity-quality bone levels and the physical activity level could explain the differences found between males and females, existing a sexual dimorphism on the human specie that makes possible to determine sex from its bones, being one bones more discriminant than others. Regarding the existing methods to determine sex from an skeletal remain there are mainly two: the morphologic and metric methods. The morphologic method is commonly used on the cranium and pelvis and the metric method on the rest of the postcranial skeleton. The bone volume study to determine sex seems not having aroused a big interest because few studies are found that have described the discriminant power of this variable. This could be due to the lack of reliable techniques to calculate it, not for thinking that the variable volume was not going to discriminate sex well. On the published studies the researchers calculated the volume using the displacement fluid technique, showing the inconvenience of immersing the bone in water and being part of the liquid absorbed by the bone because of its porosity, not being accurate the volume calculation. Nowadays the new advancements on 3D technology make possible to digitalize the bone and calculate its volume in a reliable manner using informatic tools. Four bones of the postcranial skeleton were selected to perform the present study, considering its morphology, size and easy manipulation to be digitalized correctly, and also considering their anatomical position in the body; talus, radius, clavicle and patella.

## **Objectives**

The main objective of this thesis is to analyze the discriminant power of the variable volume on the talus, radius, clavicle and patella to determine sex and offer classification functions that can be applied over spanish population. The specific objectives proposed are the following;

1. To verify that it is possible to digitalize the bones and to obtain a reliable 3D reproduction.
2. To confirm that it is possible to take measures on the 3D reproductions in a reliable manner.
3. To confirm that it is possible to calculate the total volume of the bone and the volume of certain anatomical regions.



4. To determine the discriminant power of the volumetric variables to determine sex on the sample study.
5. To obtain classification functions to be applied over the spanish population to determine the sex of the skeletal remains under study.
6. To study the differences by side.
7. To verify that the classification functions obtained can be applied over the spanish population through validation tests.

### **Material and methods**

The sample used on the preset study originates from two contemporary Spanish Reference Collections located in the Legal Medicine School of Madrid in the Complutene University of Madrid. The first Reference Collection EML 1 is made up of 132 individuals borned in different regions of Spain, between the years 1881 and 1973, and died between 1975 and 1985. The second Reference Collection EML2 is made up of 88 individuals borned between 1941 and 1976, and died in 1996. When the tali and radii studies were performed the second collection was being cleaned so the study was performed using the first collection and only a few bones of the second collection were used for the validation test. In total the study sample is formed by the tali of 88 individuals, the radii of 77 individuals, the clavicle of 100 individuals and the patellae of 134 individuals.

Once the bones which form the sample were recovered, considering that only that bones in a good state of preservation were selected, rejecting those which showed taphonomic or pathologic alterations, the whole sample was 3D scanned. For this task the 3D Picza Laser Scanner was used, this scanner is located in the Computer Center of the Complutense University of Madrid. The scanner mechanism consists of the projection of a beam laser that explores the surface of the object, selecting a distance between points. For the present study the optimal distance between points, considering quality and time, was 0.4 mm. Depending on the bone morphology, the type and quantity of the scans are different. The two possible type of scans are the rotatory and the plane scans. To 3D scan the talus and the patella two rotatory and one plane scans were necessary. To 3D scan the radius and the clavicle six plane scans were necessary. Once the scans of the different orientations were obtained the Pixform program was used to join and fuse the different orientations having to find three points in common to join two orientations. Once the image is complete it is necessary to treat it. The treatment consists of cleaning the image, filling the holes and smoothing the surface, using

the software Geomagic. Once this process is finished the image is prepared to take the measures on it. In total 5 volumetric variables were calculated in the talus, 4 in the radius, 4 in the clavicles and 5 in the patellae. Also 6 metric variables were measured in clavicle and patella. All the measures were taken twice with an interval of time of two months. Furthermore to verify the differences between the measures taken on the dry bone and on the 3D reproduction 3 metric variables were measured on the clavicle dry bone and 2 metric variables were measured on the patella dry bone, also these measures were taken twice with an interval of time of two months. A sample of 20 individuals was also measured on each bone by a second observer taking the measures also twice. The statistical study was performed with the PASW Statistics 18 creating a data base containing the value of the variables, separating the data by sex and side. The kolmogorov-Smirnov test was performed to study the distribution of the sample. A statistical analysis was performed, including the mean values for each variable and their standard deviations. Paired *t*-tests were performed to verify if there were statistically significant differences between the same two measures, between the measures taken on the 3D image and on the dry bone and also to verify if there were differences by side. Because the sample of the clavicle and patella is made up of two collections an unpaired *t*-test was performed to confirm if there were statistically significant differences between collections. An unpaired *t*-test was performed to confirm if there were statistically significant differences by sex and then perform the discriminant analysis which consists of obtaining classification functions and intervals of each variable. Finally a validation test was performed applying the formulae obtained for each variable on a sample of 20 individuals.

## **Results**

The Kolmogorov-Simornov results ( $p>0.05$ ) reject the hipotesis that the sample does not follow a normal distribution so parametric tests were performed. The paired *t*-tests results reveal there are not statistically significant differences ( $p>0.05$ ) between the two measures taken on the bone, on the 3D image, nor between them, so the statistical study was continued on the 3D images. A mean was calculated with the two measures taken on the 3D image to minimize errors. No statistically significant differences ( $p>0.05$ ) were found between the two measures taken by the second observer, neither between these measures and the ones taken by the first observer, so the reliability of the measurements was confirmed. The results related to side differences are diverse and are exposed separately. For the total volume statistically significant differences by side were found ( $p<0.05$ ) on the radius and clavicle but not on the

talus and the patella. These two last hardly show asymmetries by side, showing the radius and the clavicle a greater general asymmetry, being the values of the right side greater than the left side, except for the clavicle maximum length. All bones displayed statistically significant differences by sex, being the male values greater for all the variables. The left talus showed better classification percentages than the right talus, being the total volume the best qualifying variable, classifying correctly the 90.9% of the sample. By contrast the right radius showed better classification percentages than the left radius, classifying correctly the 96.9% of the sample considering the diaphysis volume. For the clavicle, but not in all variables, better results are obtained with the right side, being the diaphysis volume the best qualifying variable, correctly classifying the 94% of the sample. The best results were obtained combining metric and volumetric variables, achieving the 96% of correctly classified. For the patella better results were obtained with the right side, being the total volume the most dimorphic variable, classifying correctly the 82.4% of the sample. The best classifying result was obtained with a combination of metric and volumetric variables achieving the 86.5% of correctly classified. The validation tests confirm the results obtained by the discriminant analysis, classifying correctly the 90% of the sample with the talus, the 95% with the radius, the 100% with the clavicle and the 93.3% with the patella.

### **Conclusions**

1. It has been possible to digitalize the bones and reproduce them in a reliable manner, being able to take measures and calculate volumes on the 3D images, also in a reliable manner.
2. The total volume variable has been able to correctly classify the 90.9% of the sample from the left talus, the 93.9% from the right radius, the 92% from the right clavicle and the 82.4% from the right patella.
3. The total volume has been the best qualifying variable for the talus and the patella, not so in radius and clavicle where the right diaphysis volume has obtained the highest percentages of correct clasification, 96.9% and 94% respectively.
4. The talus and the patella have hardly shown differences by side, showing more asymmetry the radius and the clavicle, being the right values greater except for the maximum length of the clavicle.
5. The validation test confirms the results obtained by the discriminant analysis so the formulae can be applied over the Spanish population in a reliable manner.

# ***1. INTRODUCCIÓN***

---





Una vez se recuperan restos esqueléticos la finalidad de su estudio es determinar el mayor número de características biológicas para llegar a la identificación del individuo [1]. Uno de los objetivos principales a los que se enfrenta un Antropólogo Forense ante unos restos óseos sin identificar es determinar el sexo de los mismos, siendo este un paso esencial para el proceso de identificación positiva [2].

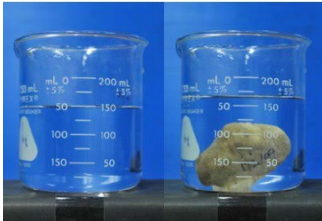
Principalmente se aplican dos métodos para determinar el sexo en unos restos óseos; el métrico y el morfológico, dependiendo del resto se usará con mayor frecuencia uno u otro, siendo más frecuente el uso de los métodos morfológicos en el cráneo y en la pelvis donde la estimación del sexo en un individuo adulto se hace de forma cualitativa observando las diferencias morfológicas entre ambos sexos [3] y siendo más frecuente el uso de métodos métricos en el resto de huesos del esqueleto postcraneal.

Los métodos basados en el análisis de diferencias morfológicas tienen un porcentaje más alto de subjetividad porque pueden variar en función de la experiencia del observador, en cambio los métodos basados en diferencias métricas ganarían en objetividad. Hay que tener en cuenta que el valor de determinadas características varía según el grupo humano que se esté estudiando [4], pudiendo existir caracteres que estén muy desarrollados en los varones de una población, lo cual sería considerado como indicador de sexo masculino, pero que lo estén poco en otra población con lo que, sin más referencias, se podría considerar como femenino a un individuo que realmente es masculino o viceversa. Lo mismo ocurre con las variables métricas, no teniendo todas las poblaciones el mismo tamaño medio en los diferentes huesos ni la misma variabilidad con lo que parece necesario disponer de amplias series de esqueletos completos de cada uno de los grupos poblacionales para conocer su variabilidad, ya que teniéndola en cuenta se podrá alcanzar un cierto grado de certeza en la determinación del sexo [4]. Entre los diferentes factores que podrían dificultar la determinación del sexo entre ellos se encuentra el estado de conservación del hueso [5] pudiendo hallarse este, fragmentado o alterado por cambios tafonómicos, lo cual dificultaría la labor. Cuando esto ocurre sería una ayuda el conocer el poder discriminante de variables que no solo valoren la totalidad del hueso sino que se centren en regiones concretas del mismo.

En cuanto al estudio del poder discriminante de las variables métricas para determinar el sexo se han realizado estudios en prácticamente la totalidad de los huesos del esqueleto postcraneal y en múltiples poblaciones, incluida la española. En cuanto al poder discriminante de la variable volumen para determinar el sexo a partir de un hueso, apenas se

encuentran estudios que lo valoren, no encontrando ningún estudio en población española. El volumen es una magnitud escalar que se define como el espacio ocupado por un cuerpo. La técnica utilizada en esos estudios para el cálculo del volumen fue la de desplazamiento de fluido la cual consiste en sumergir el hueso en un recipiente graduado con agua, de forma que al sumergir el hueso este desplaza un volumen de líquido igual a su volumen el cual puede ser medido observando la graduación del recipiente (Fig. 1).

**Fig. 1** Cálculo de volumen por desplazamiento de fluido



\*Imagen de Phoophalee *et al.*

La aparición de los escáneres 3D y el desarrollo de programas con nuevas herramientas informáticas hacen posible el cálculo y el estudio del poder discriminante de esta variable de una forma fiable. De entre los huesos del esqueleto postcraneal se encuentran cuatro que han sido objeto de estudio en la presente tesis. Las características, desarrollo, anatomía y dimorfismo sexual de los mismos es comentado en los siguientes apartados.

### 1.1 El astrágalo

El astrágalo es el segundo tarso más grande y el segundo hueso en osificar. Articula en su norma superior con la tibia, en su norma lateral con el peroné, en su norma inferior con el calcáneo y anteriormente con el hueso navicular. Los aspectos más interesantes del astrágalo es que es un hueso prácticamente articular en su totalidad y no presenta lugares de inserción tendinomuscular. Por su posición en el pie constituye un elemento esencial para mantener la estabilidad del tobillo. A su vez recibe y transmite las fuerzas que le llegan desde la tibia, a través de sus superficies articulares, hacia el calcáneo y los principales puntos de apoyo de la bóveda plantar [6].

#### *1.1.1 Desarrollo del astrágalo*

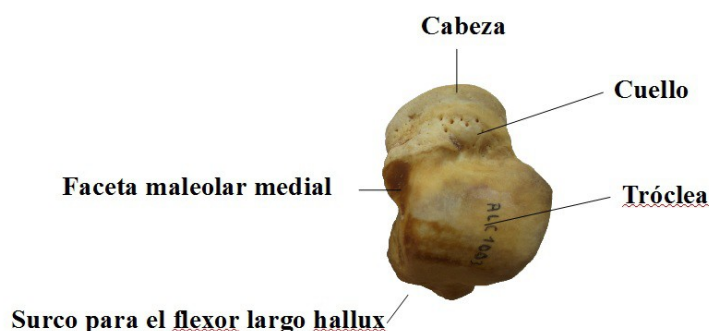
El astrágalo aparece entre el sexto y el séptimo mes fetal. En el nacimiento tiene forma de nódulo ovoide, el cual se encuentra comprimido de arriba abajo debido a las depresiones en la superficie plantar y dorsal. En su norma lateral presenta una pequeña cresta mientras que en

la medial no se aprecia ningún caracter. En la última etapa de la infancia la depresión dorsal se hace más profunda formando una constricción claramente definida; el cuello. Este se encuentra detrás de la cabeza, la cual articula con el navicular y presenta una morfología alargada y redondeada. El extremo proximal del hueso también es redondeado pero es más ancho y está más vascularizado que la cabeza distal. Aproximadamente a los 2 años el astrágalo alcanza su morfología adulta con una mayor definición de la cabeza y el cuello, desarrollándose la tróclea con su forma redondeada en la norma posterosuperior del hueso, la cual articula con la tibia. Más adelante en la infancia, la superficie articular queda bien definida por la cabeza, la tróclea y en la superficie inferior por la articulación con el calcáneo. El astrágalo alcanza su tamaño adulto durante la adolescencia. En su norma superior presenta una gran tróclea, convexa, con forma de silla de montar, el área estrangulada no articular del cuello y la cabeza redondeada en el extremo distal. En su norma inferior, hay dos o tres facetas articulares correspondientes al patrón de articulación con el calcáneo y un surco profundo denominado sulcus tali que separa la gran faceta cóncava posterior y la faceta calcánea medial. Esta faceta puede estar bien diferenciada o ser continua con la faceta calcánea anterior. A cada lado del hueso hay superficies articulares que se extienden desde la tróclea; una faceta lateral de mayor tamaño que tiene forma de triángulo invertido y se extiende hasta el margen inferior del hueso articulando con el extremo distal del peroné (maléolo lateral) y otra faceta más pequeña en la norma medial, orientada anteroposteriormente, que articula con el maléolo medial de la tibia. El astrágalo puede tener una pequeña epífisis que aparece entre los 7 y los 11 años de edad y que normalmente se fusiona uno o dos años más tarde. Esa epífisis es muy pequeña, de forma triangular y se fusiona en el margen posterior del astrágalo para formar el tubérculo lateral. En algunos casos la epífisis no se fusiona, formando el hueso separado os trigonum [7].

### 1.1.2 Anatomía y métrica del astrágalo

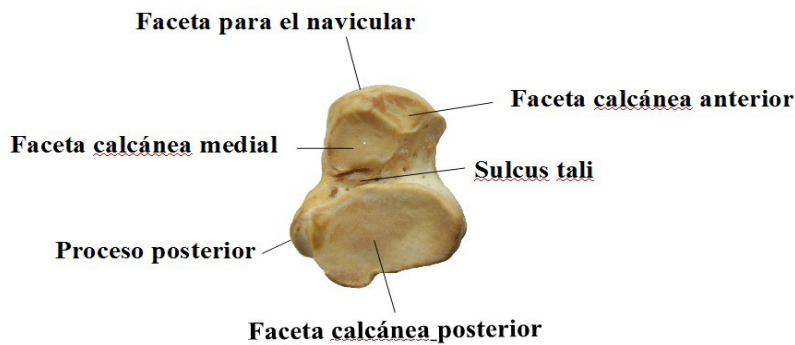
En el astrágalo se distinguen principalmente las siguientes regiones anatómica [8];

**Fig. 2** Vista superior astrágalo derecho

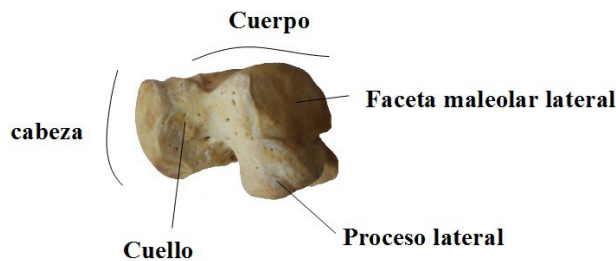




**Fig. 3** Vista inferior astrágalo izquierdo



**Fig. 4** Vista lateral astrágalo izquierdo



Las medidas que más comunmente se han tomado en los estudios métricos de astrágalo para determinar el sexo son las siguientes [9]:

Longitud total del astrágalo: distancia entre el tubérculo lateral de la apófisis posterior del astrágalo al punto más distal de la facies articulares navicularis.

Longitud del astrágalo: distancia entre el surco del músculo flexor largo del primer dedo al punto más distal de la facies articularis navicularis.

Anchura del astrágalo: distancia entre el vértice inferior de la facies malleolaris lateralis al punto más prominente del tubérculo medial de la apófisis posterior del astrágalo.

Longitud de la tróclea astragalina: distancia entre el borde anterior y posterior de la tróclea astragalina a nivel del surco mediano.

Anchura de la tróclea astragalina: distancia entre los márgenes lateral y medial de la tróclea astragalina en el punto que esta queda dividida en dos mitades.

Altura máxima del astrágalo: distancia proyectada desde el plano horizontal al punto más alto de la tróclea astragalina, tanto si está en la vertiente medial como en la lateral.

Altura media del astrágalo: distancia proyectada desde el plano horizontal al punto más alto en la zona medial de la tróclea astragalina.

Longitud de la facies articularis calcánea posterior: distancia entre los puntos más lateral y medial de la facies articularis calcánea posterior, situados en el borde de la facies.

Anchura máxima de la facies articularis calcánea posterior: distancia entre los puntos más anterior y posterior de la facies articularis calcánea posterior, situados en el borde de la facies.

Longitud cabeza-cuello: distancia entre el borde anterior de la tróclea astragalina y el punto más anterior de la cabeza del astrágalo

Altura de la facies malleolaris medialis: distancia entre el punto más superior y el más inferior de la facies malleolaris medialis.

### *1.1.3 Dimorfismo sexual del astrágalo*

El dimorfismo sexual del astrágalo se ha estudiado en diferentes poblaciones. El primer trabajo que destaca es el de Steel (1976) el cual propone funciones discriminantes calculadas a partir de una muestra de 120 individuos (60 americanos origen caucásico (30 mujeres y 30 varones) y 60 americanos origen africano (30 mujeres y 30 varones)) procedentes de la colección Terry de la Smithsonian Institution [10].

En población española destacarían especialmente dos trabajos; el de Castellana et al. (1988) y el de Palacios (1995). Castellana et al. (1988) realizaron un estudio osteométrico sobre 125 astrágalos procedentes de la necrópolis de S'Illet des Porros s.VI-II a.C. (período talayótico II durante la Edad de Hierro de Mallorca) [11] y Palacios (1995) realizó su tesis sobre la biometría del astrágalo a partir de una muestra de 60 astrágalos (30 derechos y 30 izquierdos) procedentes de la osteoteca del Departamento de Ciencias Morfológicas y Cirugía de la Universidad de Alcalá de Henares [12]. Los individuos provenían de fosas comunes de un cementerio sin especificar, por lo que se desconoce, sexo, edad y época. En ambos casos la determinación del sexo la hicieron utilizando las funciones de clasificación de Steel (1976) ya que no disponían de funciones de clasificación sobre series españolas.

Uno de los últimos trabajos publicados ha sido el de Gualdi-Russo (2006) ofreciendo funciones de clasificación obtenidas a partir de una muestra de 118 individuos procedentes de la colección Frassetto (Universidad de Bolonia) del norte de Italia y del s.XIX [13]. Mahakkanukrauh et al. (2014) estudiaron 252 esqueletos de una colección de la Universidad Chiang Mai. Tomaron diez medidas en cada uno de los astrágalos, siendo la longitud de la tróclea la más discriminante (88.2%), la cual en combinación con la tróclea llegaba a clasificar el 91.4% de

la muestra [14]. Bidmos et Dayal (2003) estudiaron una muestra de 120 astrágalos de población Sudafricana de origen caucásico procedentes de la colección Raymon A. Dart. Midieron un total de 9 variables métricas y consiguieron clasificar el 88% de la muestra con el método de inclusión por pasos [15]. Bidmos et Dayal (2004) realizaron el mismo estudio sobre una muestra de 120 astrágalos pero sobre población Sudafricana de origen africano llegando a clasificar correctamente el 89% de la muestra [16]. Lee et al. (2012) estudió una muestra de 140 astrágalos de población coreana, midiendo 9 variables, llegando a clasificar correctamente el 87.1% de la muestra combinando todas las variables [17].

## 1.2 El radio

El radio es uno de los dos huesos que conforma el antebrazo, situado lateralmente en posición anatómica, y es el hueso más corto de los tres que forman el brazo. En su extremo proximal articula con el cúbito y con el húmero y en su extremo distal articula con el cúbito, con el escafoides y con el semilunar. Su nombre hace referencia a la acción que realiza, la de un movimiento de giro sobre el capitulum del húmero el cual permite rotar al hueso en relación al cúbito el cual se encuentra más fijo [8].

### *1.2.1 Desarrollo del radio*

En su etapa de crecimiento el radio está formado por una diáfisis, una epífisis proximal y una epífisis distal. Durante el primer trimestre el radio aparece como un cartílago que empieza a osificarse durante su séptima semana en el útero. La epífisis proximal empieza su osificación alrededor de los 5 años de edad y la epífisis distal la empieza entre el primer y el tercer año. La diáfisis del radio se presenta como un hueso tubular de pequeño diámetro con extremos característicos mientras que el extremo distal del hueso se ensancha bilateralmente y el extremo metafisal proximal presenta una morfología redondeada. La tuberosidad radial, situada justo debajo de la metáfisis proximal aparece como una protuberancia desde el tercer mes uterino. La epífisis proximal inicialmente aparece como un disco circular con una superficie rugosa en su lado metafisal y una superficie lisa en su superficie articular. Esta superficie articular adopta una forma ligeramente más cóncava alrededor de los 10 años. La epífisis proximal se fusiona a la diáfisis entre los 11 y 15 años en mujeres y entre los 14 y 17 años en varones. La epífisis distal es delgada y en forma de cuña y al igual que la epífisis proximal la superficie metafisal es rugosa y la superficie articular lisa. Durante el crecimiento la epífisis se va engrosando y sobre los 10 años de edad tiene una forma rectangular con un corte diagonal en una esquina que identifica el borde posterolateral. En el otro extremo, en su

lado medial, aparece una muesca definida que sirve de articulación para el cúbito. El tubérculo dorsal aparece ya como una protuberancia en la zona posterior de la epífisis y en este período ya se evidencian dos concavidades en la superficie articular una para el escafoides y la otra para el semilunar. En la adolescencia el proceso estiloides está presente e identifica la zona lateral de la epífisis. La epífisis distal se fusiona con la diáfisis entre los 14 y 17 años en las mujeres y entre los 16 y los 20 años en los varones [7].

### 1.2.2 Anatomía y métrica del radio

En el radio se distinguen principalmente las siguientes regiones anatómicas [8];

**Fig. 5** Vista anterior radio izquierdo



Las medidas que más comunmente se han tomado en los estudios métricos del radio para determinar el sexo son las siguientes [9]:

Longitud máxima: la distancia entre el punto más proximal de la cabeza del radio hasta la punta del proceso estiloides sin considerar el eje longitudinal del hueso.

Diámetro sagital: el diámetro antero-posterior en el punto medio de la diáfisis.

Diámetro transverso: la distancia entre las superficies medial y distal máxima del hueso en el punto medio de la diáfisis.

Diámetro mínimo de la cabeza: distancia mínima de la circunferencia de la cabeza del radio.

Diámetro máximo de la cabeza: distancia máxima de la circunferencia de la cabeza del radio.

Anchura distal: distancia entre el punto más medial de la escotadura cubital y el punto más lateral de la apófisis estiloides.

Circunferencia de la tuberosidad: longitud de la circunferencia alrededor de la tuberosidad radial.

### *1.2.3 Dimorfismo sexual en el radio*

El dimorfismo sexual del radio se ha estudiado en diferentes poblaciones. Berrizbeitia (1989) estudió un total de 1108 radios de 567 individuos originarios de America del Norte que formaban parte de la colección Terry que se encuentra en la Smithsonian Institution. Midió los diámetros mínimo y máximo de la cabeza del radio, consiguiendo clasificar correctamente el 96% de la muestra [18]. Barrier et L'Abbé (2008) estudiaron una muestra de 200 varones y 200 mujeres procedentes de las colecciones de la Universidad de Pretoria y de Raymond A.Dart. Midieron 9 variables métricas en el radio y 7 en el cúbito. En el radio las variables más discriminantes fueron la anchura distal, el diámetro mínimo en el punto medio de la diáfisis y el diámetro máximo de la cabeza. Llegaron a clasificar correctamente entre el 76-86% de la muestra [19]. Allen et al. (1987) estudiaron las radiografías de una muestra de una colección esquelética de Alemania midiendo el diámetro subperióstico en el punto medio de la diáfisis, la longitud máxima y la anchura transversa máxima distal, siendo esta última la más discriminante con un 85% de clasificados correctamente [20]. Chariasi (2010) estudió los huesos del brazo de 204 individuos adultos de la colección esquelética de la Universidad de Atenas midiendo la longitud máxima y las anchuras de las epífisis distales en el radio, alcanzando un porcentaje del 94.6% con el diámetro de la cabeza del radio [21]. Kranioti et Tzanakis (2015) estudiaron una muestra de 173 esqueletos de origen griego y tomaron 12 medidas en los huesos de la extremidad superior. En el radio midieron la longitud máxima, el diámetro de la cabeza del radio y la anchura de la epífisis distal, siendo la primera la más discriminante clasificando correctamente al 91.33% de la muestra [22]. Sakaue (2004) estudió una muestra de 64 individuos de origen Japonés y tomó una serie de medidas en los huesos de la extremidad superior e inferior, midiendo el diámetro sagital de la cabeza del radio. El porcentaje de clasificados correctamente varió entre el 91 y el 95%. Teniendo en cuenta el origen variado de las poblaciones estudiadas y los resultados obtenidos parece que el radio es un hueso que discrimina muy bien el sexo, superando el 90% de acierto y llegando en algunos casos al 95% [23].

### 1.3 La clavícula

La clavícula es única en su forma y desarrollo. Se la considera un hueso corto debido a su forma tubular, actúa como soporte en la articulación del hombro y es lugar de anclaje de

varios músculos. Articula en su norma medial con el manubrio del esternón y lateralmente con la escápula e inferiormente con la primera costilla. La clavícula es el primer hueso en osificar en el útero y el último hueso que se fusiona (la epífisis medial completa su fusión a mitad de la segunda década) lo que le hace un hueso interesante en el contexto forense para la determinación de la edad [24].

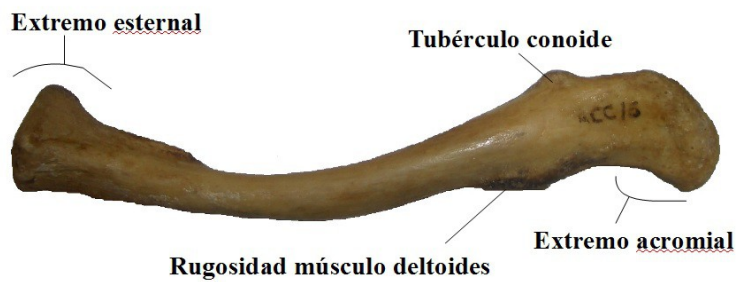
### *1.3.1 Desarrollo de la clavícula*

La clavícula empieza a osificarse antes que ningún otro hueso del cuerpo, empezando este proceso en la quinta semana uterina. La osificación de la clavícula es complicada y parece que es el único hueso infracraneal con osificación intramembranosa. Se desarrolla tanto de forma intramembranosa como endocondral a partir de dos centros de osificación primarios que conforman la diáfisis. Además tiene un centro secundario que forma las epífisis medial o esternal. Esta epífisis puede empezar su osificación alrededor de la pubertad pero frecuentemente no aparece hasta la última etapa de la adolescencia. Mientras que la clavícula es el primer hueso en osificar, su epífisis medial es la última en fusionarse, generalmente a mediados de la segunda década de vida. También podría desarrollarse una epífisis lateral a los 19 o 20 años pero se fusiona muy rápidamente con lo que raramente se encuentra en el contexto arqueológico. En la semana 11 intrauterina, la diáfisis ya presenta la forma característica en S típica de la etapa adulta y que la distingue de otros huesos. El extremo medial o esternal es redondeado si se le hace un corte y la superficie epifisal de la metáfisis medial es un ovoide orientado verticalmente que se expande inferiormente de forma notable en todas las edades. El extremo lateral o acromial es plano si se le hace un corte, provocándole una apariencia rectangular en la superficie metafisal. La norma inferior de la clavícula presenta una indentación rugosa conocida como tuberosidad costal en el extremo medial, un agujero nutricio en la parte media de la diáfisis y el tubérculo conoide y la línea oblicua del trapecio en el extremo lateral. En un principio la epífisis medial aparece como un trozo de hueso pequeño, oval, de menor tamaño que el extremo medial de la diáfisis. Normalmente es un capuchón separado pero puede aparecer también como una escama plana que se forma en la superficie metafisal de la diáfisis [7].

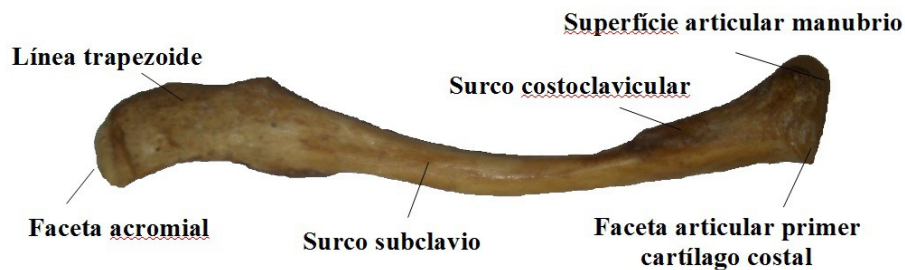
### *1.3.2 Anatomía y métrica de la clavícula*

En la clavícula se distinguen principalmente las siguientes regiones anatómicas [8];

**Fig. 6** Vista superior clavícula izquierda



**Fig. 7** Vista inferior clavícula izquierda



Las medidas que más comúnmente se han tomado en los estudios métricos de clavícula para determinar el sexo son las siguientes [9]:

Longitud máxima: la distancia entre los extremos más proximal y distal de la clavícula.

Diámetro sagital: la distancia antero-posterior de la superficie en el punto medio de la diáfisis, coincidiendo normalmente con el diámetro máximo.

Diámetro vertical: la distancia desde la superficie cranial a la caudal en el punto medio de la diáfisis.

Circunferencia: longitud de la circunferencia en el punto medio de la diáfisis

### *1.3.3 Dimorfismo sexual de la clavícula*

El dimorfismo sexual en la clavícula se ha estudiado en diferentes poblaciones, uno de los primeros estudios es el de Jit et Singh (1966) sobre población India [25]. Patel et al. (2006) realizaron un estudio sobre una población de la zona de Gujarat midiendo la longitud, la circunferencia en el punto medio de la diáfisis y el peso, obteniendo resultados que variaban de 19.56% a 84.9% [26]. Se han realizado estudios sobre una población de Guatemala (Ríos, 2002) midiendo la longitud y la circunferencia en el punto medio de la diáfisis, clasificando

correctamente del 85.6 al 94.8% de la muestra [27]. Haque et al. (2011) realizaron el estudio sobre población nepalí midiendo la longitud de la clavícula logrando clasificar correctamente entre el 83.61 y el 95.56% de la muestra [28]. Papaioannou et al. (2012) estudiaron una muestra de población griega moderna, tomando seis medidas métricas y obteniendo los mejores resultados con la longitud máxima y la circunferencia en el punto medio de la diáfisis, llegando a clasificar correctamente el 89.8% de los casos [29]. Akhlagi et al. (2012) estudiaron una muestra de población iraní midiendo la longitud máxima y la circunferencia en el punto medio de la diáfisis pudiendo determinar correctamente el sexo en el 73.3%-88.3% de los casos [30]. Shobha et al. (2014) estudiaron el dimorfismo sexual de la longitud máxima de la clavícula en una población india del norte de la zona de Karnataka clasificando correctamente solo un 76% de la muestra [31]. Singh et Jit (1996) fueron los únicos que estudiaron la variable volumen en la clavícula utilizando la técnica de desplazamiento de fluido [32].

#### 1.4 La rótula

La rótula es el hueso sesamoideo más grande que se encuentra en el cuerpo humano y se encuentra imbricado en el tendón del músculo cuádriceps femoral, su principal función es la de proteger ese tendón y mejorar el mecanismo extensor. Tiene forma triangular y se distinguen cuatro partes bien diferenciadas. La base de la rótula, la cual es ancha y es donde se inserta el músculo cuádriceps femoral desde arriba. El ápex, donde se inserta el tendón rotuliano que conecta con la tibia. La facies articulares que se encuentra en la zona posterior y articula con el fémur y la facies anterior que no es articular y es donde se une el tendón cuádriceps femoral [7].

##### *1.4.1 Desarrollo de la rótula*

La rótula articula con el extremo distal del fémur. Se desarrolla como cartílago de la séptima a la octava semana uterina y se mineraliza a partir de múltiples centros de osificación entre los 18 meses y los seis años. Normalmente no está presente hasta los 4 o 5 años de edad. Cuando empieza a osificarse, tiene forma de disco oval y a medida que el crecimiento continúa adquiere una forma más triangular. En su norma anterior desarrolla una superficie no articular y rugosa donde se une el tendón cuádriceps femoral. En la zona posterior hay dos facetas articulares separadas por una ligera elevación o convexidad que podría no ser visible hasta la infancia. La más grande de las dos facetas es la lateral. Estas superficies articulan con la epífisis distal del fémur, debajo de ellas hay una superficie no articular, pequeña y

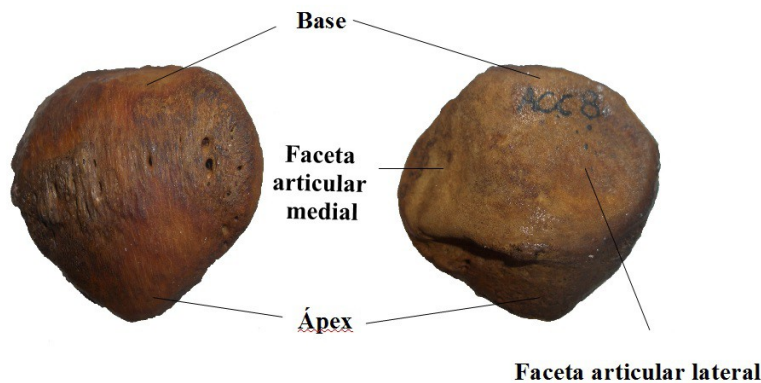


triangular conocida como ápex que se extiende inferiormente. Generalmente la rótula adquiere su morfología adulta justo antes o durante la adolescencia [7].

#### *1.4.2 Anatomía y métrica de la rótula*

En la rótula se distinguen principalmente las siguientes regiones anatómicas [8];

**Fig. 8** Vista anterior y posterior de una rótula derecha



Las medidas que más comunmente se han tomado en los estudios métricos de la rótula para determinar el sexo son las siguientes [9]:

Altura máxima: la distancia linear máxima entre la base de la rótula y el ápex.

Anchura máxima: la distancia linear máxima entre los márgenes medial y lateral.

Grosor máximo: la distancia linear máxima entre la superficie anterior y la cresta mediana de la faceta articular.

Anchura de la faceta articular medial: Anchura máxima desde el margen medial hasta la cresta mediana de la faceta articular.

Anchura de la faceta articular lateral: Anchura máxima desde el margen lateral hasta la cresta mediana de la faceta articular.

Altura máxima de la faceta articular: la distancia máxima de la faceta articular en la zona posterior de la rótula.

#### *1.4.3 Dimorfismo sexual de la rótula*

El dimorfismo sexual de la rótula se ha estudiado en diferentes poblaciones y principalmente se ha estudiado a través de las variables métricas. Gunn y McWilliams (1978) realizaron un estudio volumétrico sobre la rótula calculando su volumen mediante la técnica de

desplazamiento de fluido llegando a clasificar correctamente el 88% de la muestra [33]. Introna et al. (1988) estudió una muestra de 80 individuos del sur de Italia, midiendo siete variables y llegando a clasificar el 83.8% de la muestra combinando la anchura máxima y el grosor. Las más dimórficas fueron el grosor y la altura de la facies articularis clasificando correctamente el 78.8% de la muestra [34]. Abosamak et al. (1999) estudiaron una muestra de 62 individuos de origen egipcio midiendo siete variables, siendo la anchura máxima la más dimórfica clasificando correctamente el 93.55% de la muestra. El porcentaje más alto (95%) se consiguió combinando el grosor máximo y la anchura de la faceta articular lateral [35]. Kemkes-Grottenthaler (2005) estudió una muestra de 52 rótulas derechas de una población medieval de origen alemán clasificando correctamente el 84% de la muestra [36]. Bidmos et al. (2005) estudiaron una muestra de 120 rótulas izquierdas de Sudáfrica, de origen caucásico, de la colección esquelética Raymond A. Dart, midiendo seis variables, siendo la altura máxima la más dimórfica (85%) [37]. De igual forma Dayal et Bidmos (2005) estudiaron otra muestra de 120 rótulas de la misma colección mencionada, pero esta vez de origen africano, siendo en esta ocasión la anchura máxima y la altura máxima las variables más dimórficas, y obteniendo un porcentaje máximo de correcta clasificación del 85% [38]. Mahfouz et al. (2007) estudiaron una muestra de 228 rótulas aplicando una novedosa técnica de extracción automatizada de caracteres con lo que llegó a clasificar correctamente el 93.51% [39]. Sakaue (2008) estudió las rótulas de 183 varones y 100 mujeres de población japonesa midiendo seis variables métricas, consiguiendo clasificar correctamente el 85% de la muestra [40]. Akhlaghi et al. (2010) estudiaron una muestra de 113 rótulas que provenían de cadáveres frescos de población iraní midiendo tres variables métricas, siendo la anchura máxima la más dimórfica (91.2%) [41]. Combinando las tres variables se incrementó el porcentaje hasta el 92.9%. Phoophalee et al. (2012) estudiaron una muestra de 191 rótulas pareadas de una población del norte de Tailandia midiendo seis variables, siendo la anchura de la faceta articular lateral izquierda la variable más dimórfica (85.3%). La combinación de las seis variables llegó a clasificar correctamente el 90.5% de la muestra. También midieron el volumen con la técnica de desplazamiento de fluido consiguiendo clasificar el 80.6% de la muestra con el volumen derecho [42]. Afrianty et al. (2013) estudiaron una muestra de 133 rótulas utilizando modelos “Back Propagation Neural Network” y métodos “Artificial Neural Network” llegando a clasificar el 94.09% de la muestra [43]. Kayalvizhi et al. (2015) estudiaron las rótulas de 31 individuos del norte de India midiendo siete variables llegando a clasificar correctamente el 80.6% de la muestra [44]. En población española Peckmann et al. (2016) estudiaron las rótulas de 106 individuos de la colección osteológica de Granada llegando a

clasificar correctamente el 84.8% de la muestra combinando la anchura máxima, la anchura de la faceta lateral y la anchura de la faceta medial [45].

## 2. JUSTIFICACIÓN





El poder discriminante de la variable volumen para determinar el sexo ha sido muy poco estudiado, quizás no por considerar que fuera una variable poco discriminante sino por su dificultad de calcularlo de forma fiable. Solo se encuentran dos estudios en relación a los huesos estudiados en la presente tesis, uno en clavícula que se realizó sobre población India y otro en rótula que se realizó sobre población Tailandesa. En ambos casos la técnica que se utilizó para calcular el volumen fue la de desplazamiento de fluido. El inconveniente que presenta esta técnica es que el hueso al ser poroso absorbe parte del agua del recipiente lo que añade inexactitud a la medida. De igual forma la graduación de los recipientes utilizados no suele presentar una exactitud suficiente para calcular el volumen de una forma fiable con lo que se incrementa el error en su cálculo. Actualmente gracias a la aparición de los escáneres 3D y de programas informáticos que permiten calcular diferente tipos de variables sobre las reproducciones 3D de un objeto real se abre una nueva ventana para calcular el volumen de una forma fiable.

La necesidad de estudiar el poder discriminante de nuevas variables que puedan mejorar los resultados en cuanto a la determinación del sexo a partir de huesos del esqueleto postcraneal y la falta de estudios fiables sobre el poder discriminante de la variable volumen para determinar el sexo en población española justifican la realización de esta tesis que se presenta como un estudio pionero en dicha área.



### 3. HIPÓTESIS Y



### OBJETIVOS





### Hipótesis

El análisis volumétrico digital en hueso es más discriminante respecto al sexo que las medidas lineales.

### Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es analizar el poder discriminante de la variable volumen en astrágalo, radio, clavícula y rótula para determinar el sexo y ofrecer funciones de clasificación que puedan ser aplicadas sobre población española.

Los objetivos específicos propuestos en esta tesis son los que siguen:

1. Comprobar que se puede digitalizar cada uno de los huesos y obtener una reproducción fidedigna del original.
2. Comprobar que se pueden tomar medidas en las reproducciones 3D del hueso de forma fiable.
3. Comprobar que se puede calcular el volumen total del hueso y el volumen de las regiones anatómicas seleccionadas.
4. Comprobar el poder discriminante de las variables volumétricas para determinar el sexo en la muestra de estudio.
5. Obtener funciones de clasificación que puedan aplicarse sobre población española para determinar el sexo de los restos objeto de estudio.
6. Comprobar las diferencias según el lado.
7. Comprobar que dichas funciones se pueden aplicar sobre una muestra de población española mediante pruebas de validación.



## 4. MATERIAL Y



## MÉTODOS



#### 4.1 Muestra de estudio

La muestra utilizada para el presente estudio proviene de dos colecciones de referencia españolas contemporáneas situadas en la Escuela de Medicina Legal de Madrid ubicada en la Facultad de Medicina de la Universidad Complutense de Madrid. La primera colección EML1 está compuesta por 132 individuos nacidos en diferentes regiones de España, entre los años 1881 y 1973, y que murieron entre los años 1975 y 1985. La segunda colección EML2 está formada por 88 individuos nacidos entre 1941 y 1976, y cuya fecha de defunción es 1996. Durante el período en el que se realizó el primer estudio en astrágalo y radio la segunda colección estaba en proceso de limpieza con lo que el estudio se realizó utilizando la primera colección y los huesos que se pudieron recuperar de la segunda colección se utilizaron para la prueba de validación. Para el estudio de clavícula y rótula se pudieron utilizar ambas colecciones. En todos los casos solo se seleccionaron aquellos huesos de individuos adultos que se encontraban en buen estado de conservación y se descartaron aquellos que presentaban alteraciones tafonómicas o patológicas. La distribución de la muestra se detalla en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Distribución de la muestra según el sexo

	<b>Astrágalo</b>		<b>Radio</b>		<b>Clavícula</b>		<b>Rótula</b>	
	Varón	Mujer	Varón	Mujer	Varón	Mujer	Varón	Mujer
<b>Dcho-Izq<sup>1</sup></b>	38	43	24	26	50	50	59	30
<b>Dcho</b>	7	3	8	8			18	12
<b>Izqdo</b>	2	5	6	5			5	10
<b>Total<sup>2</sup></b>	47	51	38	39	50	50	82	52

<sup>1</sup>Individuos en los que estaban presentes los huesos de ambos lados <sup>2</sup>Número total de individuos

#### 4.2 Escaneo de la muestra

Una vez recuperados los huesos objeto de estudio se procedió a su escaneo 3D. Para esta tarea se utilizó el 3D Picza Laser Scanner el cual se encuentra situado en el Centro de Cálculo de la Universidad Complutense de Madrid.

##### *4.2.1 Escáner láser 3D PICZA LPX-250*

Se trata de un escáner que tiene la apariencia de un armario rectangular, con una puerta de acceso frontal y una plataforma rotatoria en su interior, colocada en la base (Fig. 9). Sus dimensiones son de 528x431x742 mm. El sistema de exploración de este escáner utiliza una luz láser de 600-700 nm. para explorar los objetos. En el lateral derecho es donde se

posiciona el emisor láser que emite un rayo en un punto del objeto que se pretende explorar y presenta un sensor que detecta la luz reflejada desde el objeto. Va efectuando exploraciones mientras el objeto, que se sitúa en la tabla giratoria, gira y el rayo láser se va moviendo desde abajo hasta arriba. El área efectiva del sensor es el área a la derecha del centro de la tabla, la luz láser reflejada a la izquierda del centro de la tabla no la recibe. Este escáner presenta dos modelos de exploración; la exploración de planos y la exploración giratoria [46].

**Fig. 9** Escáner láser 3D PICZA LPX-250



#### *Exploración de planos*

La exploración de planos utiliza rayos láser paralelos mientras giran la plataforma y el cabezal láser en sincronización. Con este tipo de exploración se obtienen resultados estables sin importar la forma del objeto, pudiendo explorar seis superficies de una vez (composición multiplano). Incluso resultaría útil para explorar áreas con cavidades o vacíos ya que la luz láser puede pasar a través de los vacíos. Para una mejor exploración hay que colocar el objeto cerca del centro de la tabla ya que esta es la zona efectiva del sensor para una correcta exploración [46].

### *Exploración giratoria*

En la exploración giratoria se explora el perímetro exterior del objeto mientras gira la tabla en una dirección y el rayo láser se emite hacia el centro de la tabla. Este tipo de exploración resulta útil sobre objetos con pocas irregularidades y con formas parecidas a una esfera o cilindro, realizando una exploración suave para las superficies curvadas [46].

### *Limitaciones*

No se pueden explorar todos los tipos de objetos. En general aquellos que son opacos, con una superficie relativamente suave, de color brillante y de material no satinado (plástico, madera, arcilla de modelar) no presentan ningún problema, no así en cambio los objetos claros o transparentes (en estos casos se podría aplicar un material para tratar la superficie), de tejido o con pelo, de colores oscuros, satinados o altamente reflectantes (metales, espejos, etc.). Las áreas donde el ángulo del rayo láser es demasiado poco profundo tampoco se suelen explorar correctamente por eso en muchos casos no es posible explorar aquellas áreas cercanas a la parte superior de un objeto [46].

#### *4.2.2 Digitalización de los huesos*

Los huesos cumplen las mencionadas características para poder ser explorados correctamente. Como la morfología de los huesos seleccionados varía de unos a otros también varía el tipo de exploración escogida para cada uno de ellos. Lo que es común para todos es la distancia entre puntos seleccionada, la cual varía de 0.2 a 1 mm., considerando que 0.4 mm era la distancia óptima teniendo en cuenta los parámetros calidad-tiempo. Para apoyar los huesos sobre la plataforma se recurrió a un material plástico pudiendo eliminar los restos que aparecieran en la digitalización durante el proceso de tratamiento de la imagen.

### *Astrágalo*

Debido a su forma globular la exploración que resulta más adecuada es la rotatoria con lo que se realizaron dos escaneos rotatorios, el primero posicionando la norma posterior sobre la plataforma y el segundo posicionando la norma medial o lateral sobre la plataforma para terminar de explorar las zonas que no quedaron expuestas en el anterior escaneo. Como la norma inferior del astrágalo presenta la cavidad del sulcus tali esta zona es mejor escanearla con la exploración a planos con lo que se realizó un tercer escaneo.



### *Radio*

Debido a su forma más alargada y angulosa se optó por realizar seis exploraciones de plano, cuatro de ellas para explorar la totalidad de la diáfisis y el lateral de las epífisis. Para ello se posicionó el hueso apoyando su epífisis distal sobre la plataforma, de esta forma y sin cambiar la posición del hueso se pudieron realizar los cuatro escaneos. Para las zonas articulares de las epífisis se realizó una exploración de plano para cada una, posicionando el radio tumbado lo más centrado posible en la plataforma y de forma que la zona articular mirara hacia el lateral derecho.

### *Clavícula*

De igual forma que con el radio debido a su forma alargada se realizaron seis exploraciones de plano. Cuatro de ellos para explorar la totalidad de la diáfisis posicionando la clavícula apoyando el extremo distal sobre la plataforma, y dos de ellos para explorar los dos extremos articulares, posicionando cada zona articular de cara al emisor láser y lo más centrado posible en la plataforma.

### *Rótula*

Al igual que para el astrágalo, por su forma más globulosa, se realizaron dos exploraciones rotatorias, la primera posicionando la base de la rótula sobre la plataforma y la segunda posicionando la rótula sobre su norma lateral o medial. Para la norma posterior se realizó una tercera exploración de plano para terminar de definir esta zona más irregular.

#### *4.2.3 Tratamiento de la imagen*

Una vez obtenidos los escaneos de las diferentes orientaciones se utilizó el programa Pixform para unir y fusionar las diferentes orientaciones teniendo que encontrar un mínimo de tres puntos en común para poder unir dos orientaciones. Cada vez que se unen dos orientaciones antes de unir la siguiente se procede a fusionar las mallas. Una vez obtenida la imagen completa es necesario tratarla y ese tratamiento consiste en limpiarla, rellenar agujeros y suavizarla y se llevó a cabo con el software Geomagic. Este mismo software es el que se utiliza para el cálculo de todas las variables.

#### *4.3 Variables estudiadas*

Las variables que a continuación se describen fueron medidas dos veces con un intervalo de tiempo de dos meses y en el caso de clavícula y rótula, donde además se tomaron medidas

métricas, estas se midieron también dos veces sobre el hueso seco. En el caso de la clavícula, en hueso seco y utilizando la tabla osteométrica y el calibre, se midieron la longitud máxima y los diámetros sagital y vertical en el punto medio de la diáfisis y en el caso de la rótula se midieron la altura y anchura máximas. Una muestra de 20 individuos de cada uno de los huesos fue medida además por un segundo observador.

### *Astrágalo*

En astrágalo se han estudiado 5 variables volumétricas;

1. Volumen total: volumen del astrágalo en su totalidad.
2. Volumen anterior 1: se posiciona el hueso en vista superior siendo los puntos de corte establecidos para calcular este volumen el punto más anterior de la faceta maleolar medial y el punto más anterior del margen distal de la tróclea. En este volumen quedan incluidos gran parte de la cabeza y el cuello del astrágalo.
3. Volumen anterior 2: se posiciona el hueso en vista inferior siendo los puntos de corte establecidos para calcular este volumen el extremo distal de la faceta articular para el navicular y el punto más posterior de la faceta calcánea medial. En este volumen queda incluidos gran parte de la cabeza del astrágalo.
4. Volumen anterior 3: se posiciona el hueso en vista inferior siendo los puntos de corte establecidos para calcular este volumen el extremo distal y medial de la faceta articular para el navicular. En este volumen queda incluida principalmente la faceta articular para el navicular y parte de la faceta calcánea medial.
5. Volumen de la región posterior: se posiciona el hueso en vista inferior siendo los puntos de corte establecidos para calcular este volumen el punto más anterior de la faceta calcánea posterior y el punto más anterior del tubérculo medial. En este volumen queda incluida principalmente la faceta calcánea posterior y la tróclea del astrágalo.

### *Radio*

En radio se han estudiado 4 variables volumétricas;

1. Volumen total: volumen del radio en su totalidad.
2. Volumen de la cabeza: se posiciona el hueso en vista lateral siendo el punto de corte el margen inferior de la zona articular de la cabeza. En este volumen queda incluida la totalidad de la cabeza del radio.
3. Volumen del extremo distal: se posiciona el hueso en vista lateral estableciendo el punto de corte donde empieza la prolongación latero-distal del radio. En este volumen queda incluido

la extremidad distal del radio.

4. Volumen de la diáfisis: se calcula mediante la diferencia del volumen total y la suma de los volúmenes de la cabeza del radio y del extremo distal.

### *Clavícula*

En clavícula se han estudiado 4 variables volumétricas;

1. Volumen total: volumen de la clavícula en su totalidad.

2. Volumen del extremo proximal: el punto de corte es establecido por el surco costoclavicular, incluyendo el mismo.

3. Volumen del extremo distal: el punto de corte es establecido por el tubérculo conoide, incluyendo el mismo.

4. Volumen de la diáfisis: se calcula mediante la diferencia del volumen total y la suma de los volúmenes del extremo proximal y distal, volumen que comprende la región de la diáfisis que va desde el tubérculo conoide hasta el surco costoclavicular sin incluir los mismos.

Y 6 variables métricas;

1. Longitud máxima: distancia entre los puntos más proximal y distal de la clavícula (tabla osteométrica).

2. Diámetro sagital medio diáfisis: distancia entre los puntos más anterior y posterior de la clavícula en el punto medio de la diáfisis (calibre).

3. Diámetro vertical medio diáfisis: distancia entre los puntos más superior e inferior de la clavícula en el punto medio de la diáfisis (calibre).

4. Diámetro sagital extremo distal: distancia entre los puntos más anterior y posterior de la clavícula en su extremo distal coincidente con el ápex de la curva externa desde una vista cranial (calibre).

5. Diámetro vertical extremo distal: distancia entre los puntos más superior e inferior de la clavícula en su extremo distal donde se ha medido el diámetro sagital (calibre).

6. Diámetro vertical tubérculo conoide: distancia entre los puntos más superior e inferior en el tubérculo conoide (calibre).

### *Rótula*

En rótula se han estudiado 5 variables volumétricas;

1. Volumen total: volumen de la rótula en su totalidad.

2. Volumen medial: se posiciona el hueso en vista anterior siendo los puntos de corte los que

marcan la altura máxima del hueso, siendo la mitad medial la que es considerada para este volumen.

3. Volumen lateral: se posiciona el hueso en vista anterior siendo los puntos de corte los que marcan la altura máxima del hueso, siendo la mitad lateral la que es considerada para este volumen.

4. Volumen superior: se posiciona el hueso en vista anterior siendo los puntos de corte los que marcan la anchura máxima del hueso, siendo la mitad superior la que es considerada para este volumen

5. Volumen inferior: se posiciona el hueso en vista anterior siendo los puntos de corte los que marcan la anchura máxima del hueso, siendo la mitad superior la que es considerada para este volumen.

Y 6 variables métricas;

1. Altura máxima: distancia máxima entre la base y el ápex de la rótula (calibre).

2. Anchura máxima: distancia máxima entre los márgenes medial y lateral de la rótula (calibre).

3. Grosor máximo: distancia máxima entre la superficie anterior y la cresta que separa las dos facetas de la superficie posterior (calibre).

4. Anchura de la faceta articular medial: distancia máxima entre el margen medial de la rótula y la cresta de la faceta articular (calibre).

5. Anchura de la faceta articular lateral: distancia máxima entre el margen lateral de la rótula y la cresta de la faceta articular (calibre).

6. Altura máxima de la faceta articular lateral: distancia máxima entre los puntos más superior e inferior de la faceta articular lateral (calibre).

#### 4.4 Estudio estadístico

Para el estudio estadístico se utilizó el paquete PASW Statistics 18 creando una base de datos que contenía el valor de todas las variables en las que constaba el sexo y el lado del hueso. La prueba de Kolmogorov-Smirnov se realizó para estudiar la distribución de la muestra. Se realizó un estadístico que contenía los valores medios de cada una de las variables y su desviación estándar. Se realizaron varias pruebas *t*-student para muestras pareadas y así comprobar si habían diferencias estadísticamente significativas entre las dos tomas de medidas (tanto las que se realizaron sobre el hueso seco como las que se realizaron sobre las imágenes 3D), entre las medidas tomadas sobre la imagen 3D y las tomadas sobre el hueso

seco, y para comprobar si había diferencias estadísticamente significativas según el lado y entre los dos observadores. En el caso de la clavícula y la rótula cuya muestra de estudio proviene de ambas colecciones se realizó una prueba *t*-student para muestras independientes para comprobar que no había diferencias estadísticamente significativas entre las medidas de ambas colecciones. Se realizó una prueba *t*-student para muestras independientes para comprobar si había diferencias estadísticamente significativas entre ambos sexos y realizar entonces un análisis discriminante consistente en obtener funciones e intervalos de clasificación de cada una de las variables. Finalmente se realizó una prueba de validación aplicando las fórmulas obtenidas para cada una de las variables sobre una muestra de 20 individuos.

Al realizar el análisis discriminante se pretende maximizar las diferencias entre dos grupos [47], en este caso varón/mujer. Todos los caracteres medidos presentan un intervalo de valores para hombres y mujeres el cual presenta una región de solapamiento, la cual es más o menos extensa. Contra más pequeña es esa área, con más seguridad se hace la determinación del sexo [48] pero no hay un valor absoluto que una vez se supere se pueda decir que se trata de un varón o si está por debajo que se trata de una mujer [49].

## ***5. RESULTADOS***

---





La presente tesis se estructura en artículos, siendo los mismos los que a continuación se enumeran;

**1. Determining sex by bone volume from 3D images: discriminating analysis of the tali and radii in a contemporary Spanish reference collection.**

Este artículo ha sido publicado en la revista International Journal of Legal Medicine (2012) 126:623-631 DOI 10.1007/s00414-012-0715-5 y describe la metodología a seguir para escanear en tres dimensiones el astrágalo y el radio además de estudiar el poder discriminante de una serie de variables volumétricas en una muestra de población española ofreciendo funciones de clasificación para las mismas.

**2. Determining sex with the clavicle in a contemporary Spanish reference collection: A study on 3D images:**

Este artículo ha sido publicado en la revista Forensic Science International (2016) <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.01.029> y describe la metodología a seguir para escanear en tres dimensiones la clavícula además de estudiar el poder discriminante de una serie de variables métricas y volumétricas en una muestra de población española comparando los resultados y ofreciendo funciones de clasificación para las mismas.

**3. Sex determination from the patella: a volumetric and metric study in two contemporary Spanish reference collection.**

Este artículo ha sido remitido a la revista International Journal of Legal Medicine (2017) y describe la metodología a seguir para escanear en tres dimensiones la rótula además de estudiar el poder discriminante de una serie de variables métricas y volumétricas en una muestra de población española comparando los resultados y ofreciendo funciones de clasificación para las mismas.





## 5.1 ARTÍCULO 1

### **DETERMINING SEX BY BONE VOLUME FROM 3D IMAGES:**

**Discriminating analysis of the tali and radii  
in a contemporary Spanish reference collection**

*This chapter has been published as an original article in Int J Leg Med (2012) 126:623-631  
DOI 10.1007/s00414-012-0715-5*

### DETERMINACIÓN DE SEXO POR VOLÚMEN ÓSEO EN IMÁGENES 3D:

Un análisis discriminante en astrágalo y radio  
en una colección de referencia Española contemporánea



## **Resumen**

El poder discriminante del volumen óseo para determinar el sexo no ha sido posible de determinar debido a su dificultad para calcularlo. Actualmente nuevos avances basados en tecnología 3D hacen posible reproducir digitalmente el hueso y calcular su volumen utilizando herramientas informáticas que abren una nueva ventana para discernir el poder discriminante de esta variable. Con este objetivo en mente se escanearon los astrágalos y los radios de 101 individuos (48 varones y 53 mujeres) de una Colección de Referencia Española Contemporánea (s. XX, EML1) utilizando el Picza 3D Laser escáner. En el astrágalo se calculó el volumen total, el volumen de la region posterior que incluye la faceta calcánea posterior y además otros tres volúmenes de la región anterior. En el radio se calculó el volumen total, el volumen de la cabeza, el volumen de la diáfisis y el volumen del extremo distal. Los datos se presentan para cada una de las variables, diferenciando entre lado derecho e izquierdo, y para su procesamiento se utilizó el programa estadístico PASW Statistics 18. Se obtuvieron funciones de clasificación que clasificaron correctamente el 90.9 % de la muestra de astrágalos y el 93.9 % de los radios, utilizando el volumen total izquierdo y derecho, respectivamente. Estudiando el volumen en las diferentes regiones del hueso se obtiene que la diáfisis derecha del radio es la que tiene el mayor poder discriminante, ofreciendo funciones de clasificación que clasifican correctamente el 96.9 % de la muestra. La prueba de validación se realizó sobre una muestra de 20 individuos procedente de otra Colección de Referencia Española Contemporánea (EML 2) confirmando el alto poder discriminante de la variable volumen obteniendo un porcentaje de correcta clasificación que variaba del 80 % al 95 % dependiendo de la variable estudiada.

**Palabras clave** astrágalo, radio, volumen, escáner 3D, poder discriminante



## **Determining sex by bone volume from 3D images: Discriminating analysis of the tali and radii in a contemporary Spanish reference collection**

### **Abstract**

The discriminant power of bone volume for determining sex has not been possible to determine due to the difficulty in its calculation. At present, new advancements based on 3D technology make it possible to reproduce the bone digitally and calculate its volume using computerized tools, which opens up a new window to ascertaining the discriminant power of this variable. With this objective in mind, the tali and radii of 101 individuals (48 males and 53 females) of a contemporary Spanish reference collection (twentieth century) (EML 1) were scanned using the Picza 3D Laser Scanner. Calculated for the tali were total volume, the volume of the posterior region, which includes the posterior calcaneal facet and other three volumes of the anterior region. Calculated for the radius were total volume, volume of the radius head, volume of the diaphysis and volume of the distal end. The data are presented for all of the variables, distinguishing between the right and left side. The data were processed using the statistical program PASW Statistics 18, thereby obtaining classification functions for sex which accurately classify 90.9% of tali and 93.9% of radii on the basis of their total left and right volume, respectively. Studying the volume in different regions of the bone shows that the diaphysis of the right radius possesses a high level of discriminant power, offering classification functions which accurately classify 96.9% of the sample. The validation test performed on a sample of 20 individuals from another contemporary Spanish reference collection (EML 2) confirms the high discriminant power of the volume obtaining an accurate classification rate of 80-95% depending on the variable studied.

**Keywords** talus, radius, volume, 3D scanner, discriminant power

One of the main objectives of forensic anthropology is to determine the sex of bone remains which are subjected to study. Because bones are not always available which provide a high discriminant power, such as the pelvis or skull, new studies must be performed on the postcranial skeleton in an attempt to find variables which make it possible to determine sex with a greater rate of reliability. It is recommendable to perform such studies on reference collections in which the sex of the individuals is known. The bones chosen to start this investigation have been the tali and radii. The election has been based on the size and

morphology of the bones thinking of the characteristics of the 3D scanner and the difficulties that could appear during the scan process because of the irregular morphology of the bone.

The reports published to date offer classification functions based on linear measurements for these two bones and for different populations [1-5]. The discriminant power of weight on the talus has also been studied but has proven not to be very reliable in determining sex [6]. Cranium volume, on the other hand, has undergone widespread study, using a varied methodology [7-14], with an emphasis on the interest in establishing differences between the many species of hominids [15-16], and on variability within populations [17]. More recently, there was a notable study of correlations between the different volumes of cranial regions and face size [18], as well as studies on differences in volumes among different regions of the brain based on sex [19]. As for the bone volume studies on the postcranial skeleton, the purpose with which they have been performed is variable, with an emphasis on the interest in clinical practice to observe anomalies during growth [20] or to observe volume differences in the articulation cartilage based on sex [21-22]. Also important are the studies which include new methodologies to evaluate the discriminant power of certain bones and regions; methods based on digital radiometric studies [23], lateral cephalometric studies [24] or morphometric analysis of digital photographs [25]. In terms of the specific analytical studies on sexual dimorphism using 3D imaging, one of the most noteworthy is the work by Sholts et al. (2010) completed on craniums [26], while on the postcranial skeleton the most notable are the studies based on geometric morphometrics [27-28]. In accordance with these last lines of research based on 3D imaging and due to the lack of studies which quantify the discriminant power of bone volume in determining sex on the basis of bones in the postcranial skeleton, a first study on the talus and radius bones was performed by calculating their volume in a sample taken from a contemporary Spanish reference collection (twentieth century) (EML 1).

Volume is a scalar magnitude defined as the space occupied by a body. There are different methods to calculate volume, but those that could be used for this study are the ones which can be applied to irregular objects, because both the radius and the talus possess an irregular morphology. Under such conditions, one of the methods which may be used is to calculate their volume by fluid displacement. This method is based on Archimedes' principle, which establishes that if a body is partially or fully submerged in a fluid, the fluid exerts a force up towards the body which is equal to the weight of the fluid displaced by the body [29]. When the bone is introduced into a graduated vessel containing water, the increase in the level of the

liquid would make it possible to determine the object's volume by subtraction. The disadvantage in using this method on bone is that, because it is porous, the bone absorbs a part of the water, and there would be an increase in inaccuracy when calculating the volume, because, in addition to the displaced volume, it would be necessary to bear in mind the volume of water absorbed by the bone. In addition to all of the aforementioned difficulties is the limitation of the vessel's volumetric scale. At present, considering the possibility of performing 3D scanning of bone and taking advantage of the tools offered by 3D programs, which include the calculation of volume, three-dimensional scanning was performed on the whole sample of tali and radii originating from a contemporary Spanish reference collection (EML 1), thereby making it possible to calculate the volume of 3D reproductions. On the basis of these 3D reproductions, it is not only possible to calculate the total volume of the bone but also to calculate the volume of certain anatomical regions, with the ability to study the extent of their sexual dimorphism. Not always is it possible to recover the bone on a good state of preservation, and some parts could be missed so having classification functions based on certain regions could be useful to determine sex. Also calculated were the volumes of the radius head, the diaphysis and its distal end, whereas three volumes of the anterior region were obtained in the talus, as well as the volume of the posterior region. The election of the regions has been based on the facility to identify and connect the points to perform the divisions on the image.

## **Sample**

The study sample originates from a contemporary Spanish reference collection (twentieth century; EML 1) of the School of Legal Medicine of Madrid (UCM) made up of 130 individuals born between the years 1881 and 1973 in different Spanish regions and died between the years 1975 and 1985. The distribution of the sample by sex and side is shown in table 1. Of these 130 individuals, the tali of 98 individuals (47 males and 51 females) were recovered, as well as the radii of 77 individuals (38 males and 39 females). A total of 179 tali (81 paired right and left, 10 unpaired right and 7 unpaired left) and a total of 127 radii (50 paired right and left, 16 unpaired right, and 11 unpaired left) were 3D scanned. The study sample only includes those bones whose sex is known and which are in a good state of preservation. Those which are altered, whether due to taphonomic or pathological processes, were not included in the study. The number of radii is lower than the tali because several of them were excluded due to the bad state of preservation of the radius head.



**Table 1.** Distribution of the tali and radii sample

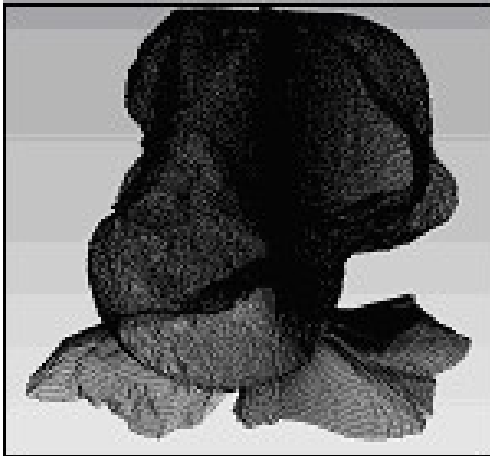
	Tali		Radii	
	<i>M</i>	<i>F</i>	<i>M</i>	<i>F</i>
<b>Paired R-L</b>	38	43	24	26
<b>Unpaired R</b>	7	3	8	8
<b>Unpaired L</b>	2	5	6	5
<b>Total</b>	47	51	38	39

*M* number of males, *F* number of females

## Methodology

The sample was scanned with a PICZA 3D Laser Scanner (made by Roland). It is a closed scanner (528x431x742 mm) with a rotating platform inside, which is accessed by way of a front door. The item to be scanned is placed on the platform, and a 600-700 nm wave laser is projected from the right side. The program that comes with this scanner is Dr.Picza3, in which the different orientations are displayed. Depending on the shape of the bone, the rotating scans are combined with the slice scans so as to be able to scan the bone in its entirety. The rotating scans are produced by the complete rotation of the platform where the item is placed, while the laser reads the surface of the object from the bottom to the top. On the slice scans, the platform realizes a slight movement which only allows scanning the part of the object which is in front of the laser. The desired distance between points must be selected within the resolution offered by the scanner. For the case at hand, the range is from 0.2 mm to 1 mm. The lesser the distance, the greater the precision the image will have and the longer the scanning time will be. For the study sample in this study, a distance between points of 0.4 mm was selected because this was considered to be the optimal option in terms of quality/time. The time needed to scan a talus ranges from 30 to 40 min, and for a radius from 60 to 90 min. In order to scan the talus, three scans were completed. In the first, the talus was placed in a vertical position, with the head oriented towards the platform, and a rotating scan was performed which made it possible to image nearly the entire surface of the bone. In the second scan, the talus was placed with its medial surface resting on the platform and the base of the talus oriented towards the laser. This made it possible to scan those areas which were not visible in the prior scan. Last of all, a slice scan was performed without changing the preceding orientation in order to obtain an extra orientation of the inferior part of the talus, due to the fact that it is especially irregular. The product of each of the scans is a point cloud (Fig. 1).

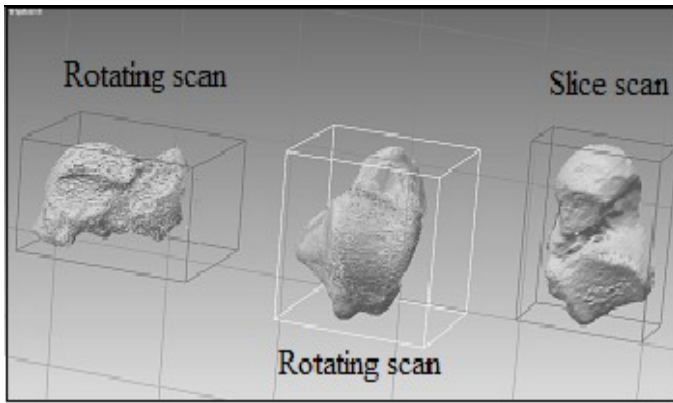
**Fig. 1** Point cloud of the talus



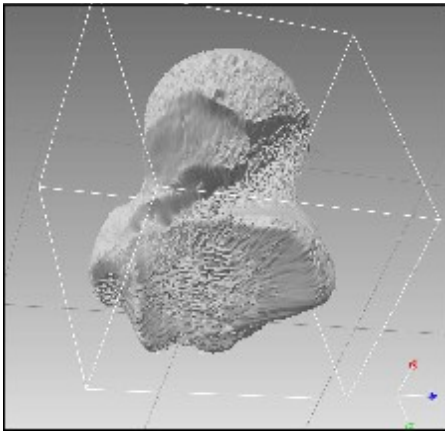
No rotating scans were performed on the radius because, due to the triangular cross section of the diaphysis, shadows were created as the laser acted over the crest, and therefore, the choice was made to perform four slice scans, placing the bone in a vertical position, supporting it on the distal epiphysis, and turning the bone 90° to the right in each new orientation. By doing this, nearly all of the bone is scanned, with the exception of the upper part of the proximal epiphysis and the lower part of the distal epiphysis, the reproductions of which are obtained by performing a slice scan of each.

The different orientations obtained (Figs. 2 and 4) were merged using the program Pixform to obtain a complete image of the bone (Figs. 3, 4, and 5). To merge two orientations is necessary to find three points in common between them. Once the merge is done, the program offers an evaluation of the result: bad, good or excellent; evaluations worst than excellent are not accepted, and the merge has to be repeated in these cases. The complete image was then processed using the program Geomagic v10 to eliminate dirt, fill in holes, smooth the surface and, last of all, calculate the volume. The entire process was repeated on a sample of 20 tali and 20 radii to calculate the total volume of the new images and compare the results with the first ones. A paired *t* test was performed to know the variation between the two volumes to study possible variations produced during the merging process and the image treatment.

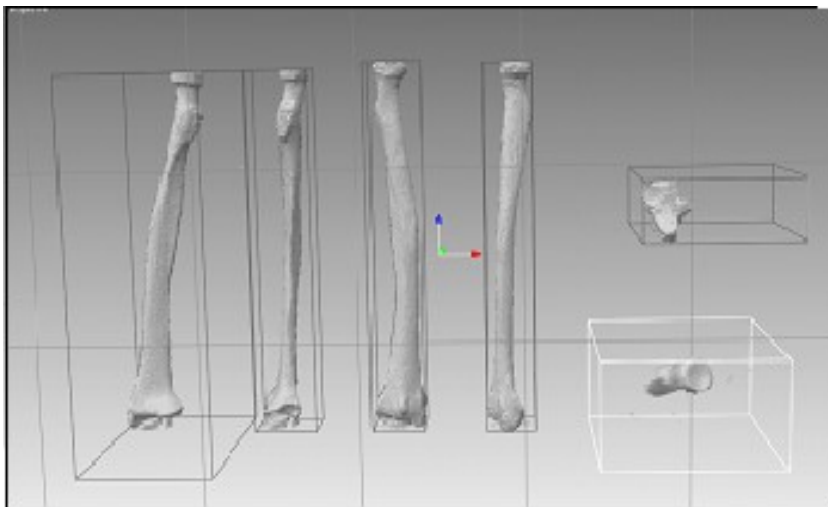
**Fig. 2** Orientations of rotating and slice scans of the talus



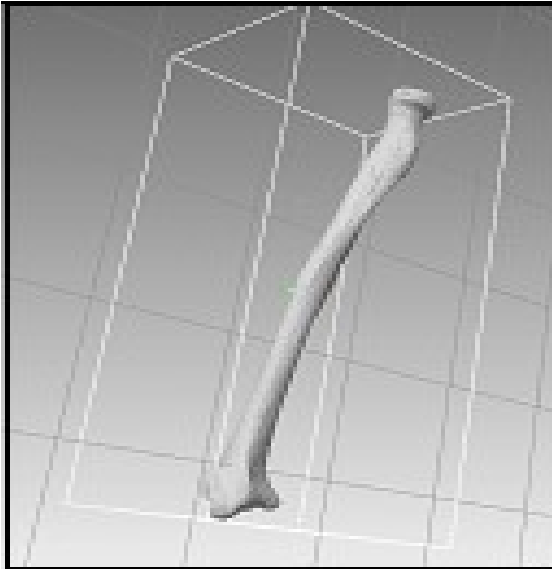
**Fig. 3** Assembled orientations of the talus



**Fig. 4** Slice orientations of the radius



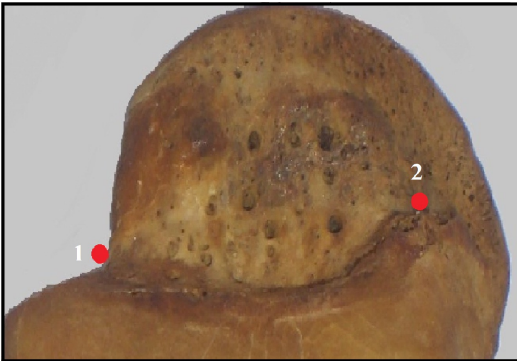
**Fig. 5** Assembled orientations of the radius



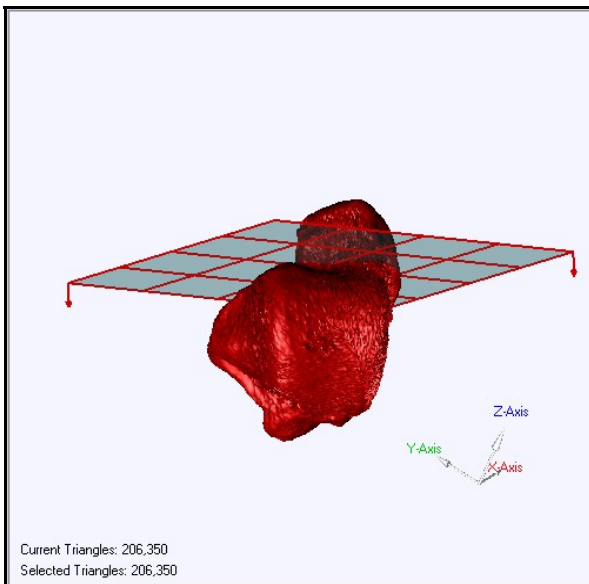
Once the image was processed, the total volume and the volume of each of the selected anatomical regions were calculated, and a database was created using the statistical program PASW Statistics 18, including a record of the sex and volumes of each of the bones. For each individual, the right and left bone volumes are included, provided that both were existing in the collection. In order to determine whether there are areas in the bone which are more discriminant than others, and for those cases in which the bone is incomplete, the volume of certain anatomical regions of the bone has been calculated. The program tool selected to accomplish that objective was “compute volume to plane”, and the option chosen to align the plane was the line. The image is divided into two by one plane, and the volume of each of the plane’s divisions is calculated.

In the case of the talus, the first volume in the anterior region (anterior volume 1) was obtained by positioning the bone in a superior view and drawing a plane ahead of the facies malleolaris medialis (point 2 Fig.6), and ahead of the anterior distal edge of the trochlea of the talus (point 1 Fig. 6). Both points always positioned on the talus neck. The volume of the superior plane’s division is the one considered (Fig.7).

**Fig. 6** Point 1 and point 2 anterior volume 1



**Fig. 7** Anterior volume 1



The second volume of the anterior region (anterior volume 2) was calculated by positioning the bone in an inferior view and drawing a plane from the distal end of the facies articularis navicularis (point 2 Fig.8) to the most posterior end of the medial calcaneal facet (point 1 Fig.9), passing above the medial tubercle. The volume of the superior plane's division is the one considered (Fig.10).

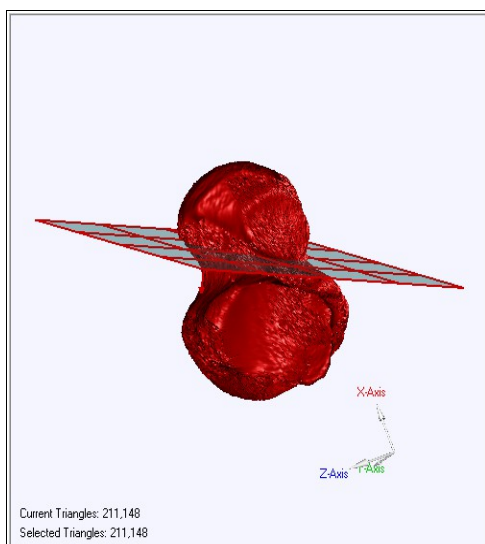
**Fig. 8** Point 2 anterior volume 2 and 3



**Fig. 9** Point 1 anterior volume 2



**Fig. 10** Anterior volume 2

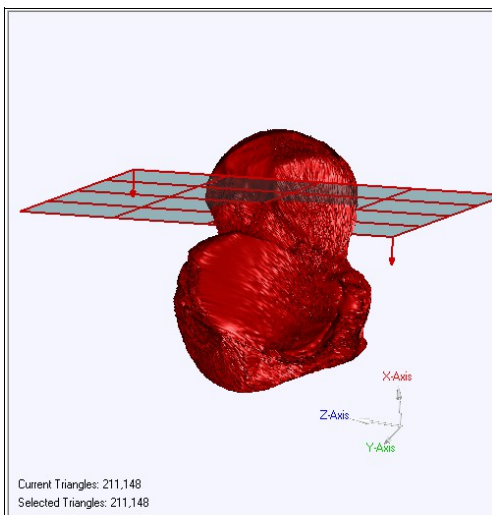


The third volume of the anterior region (anterior volume 3) was calculated by positioning the bone in an inferior view and drawing a plane from the distal end of the facies articularis navicularis (point 2 Fig.8) at its medial end (point 1 Fig.11). The volume of the superior plane's division is the one considered (Fig.12).

**Fig. 11** Point 1 anterior volume 3



**Fig. 12** Anterior volume 3

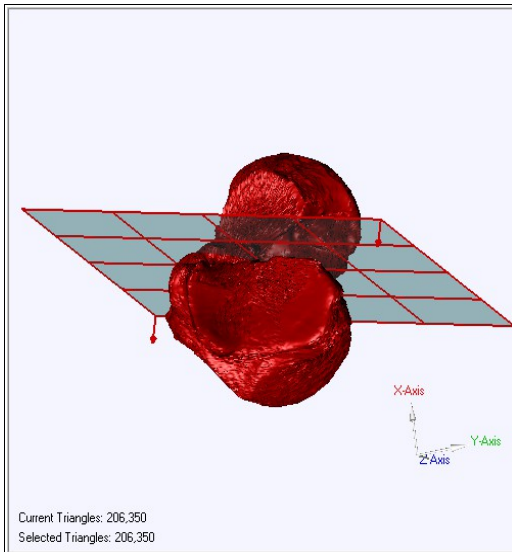


The volume of the posterior region of the talus was calculated by positioning the bone in an inferior view and drawing a plane from the most anterior point of the posterior calcaneal facet (point 1 Fig.13) to the most anterior point of the medial tubercle (point 2 Fig.13). The volume of the inferior plane's division is the one considered (Fig.14).

**Fig. 13** Point 1 and 2 posterior volume

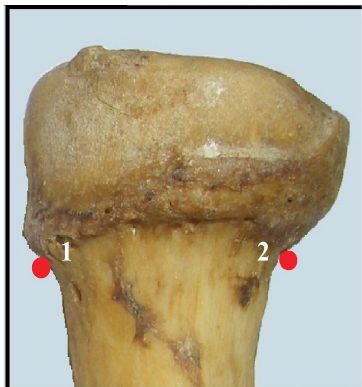


**Fig. 14** Posterior volume



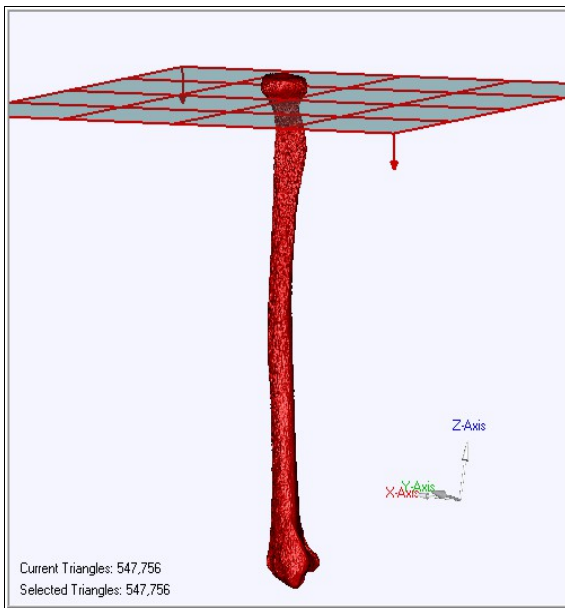
For the radius, the volume of the head was calculated by positioning the bone in a lateral position and drawing a plane connecting the most lateral inferior points of the head (point 1 and 2 Fig. 15). The volume of the superior plane's division is the one considered (Fig.16).

**Fig. 15** Point 1 and 2 head volume



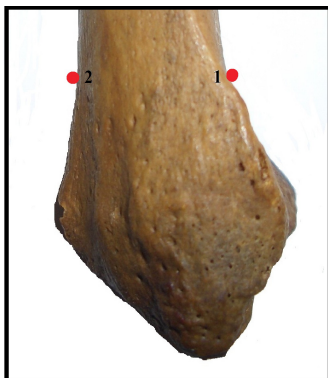


**Fig. 16** Head volume

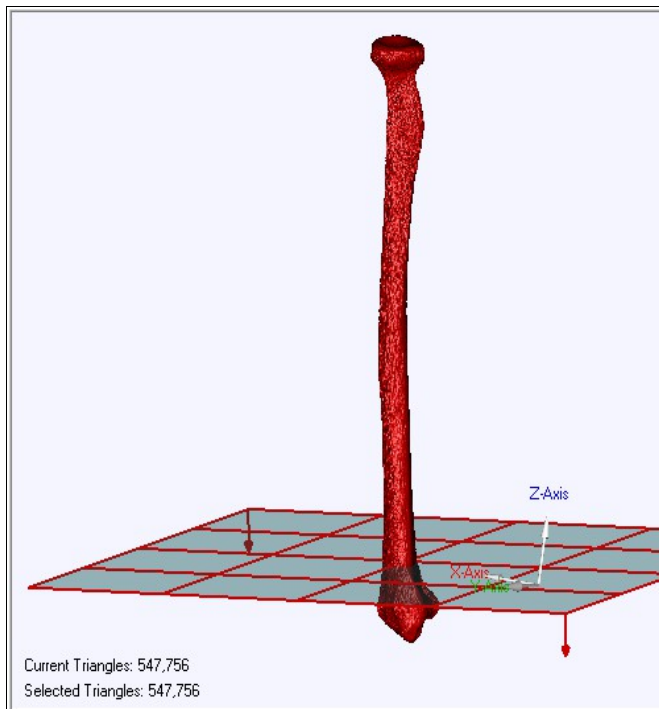


The volume of the distal end was calculated by positioning the bone in a lateral position and drawing a plane from the point where the lateral and distal prolongation of the radius begins (point 1 Fig.17) to a point positioned at the same height but at the opposite side of the diaphysis (point 2 Fig. 17). The volume of the inferior plane's division is the one considered (Fig.18). The volume of the diaphysis is obtained by calculating the difference between the total volume and the volumes of the radius head and distal end.

**Fig. 17** Point 1 and 2 distal end volume



**Fig. 18** Distal end volume



The volumes of the different anatomical regions were calculated twice with an interval of time of 2 months between measures. A paired  $t$  test was performed to verify if there were statistically significant differences between the two measures to confirm they were taken correctly. The divisions were repeated twice (with an interval of time of 1 week) on a sample of 20 tali and 20 radii by a second observer, and a paired  $t$  test was performed to study the variation between the two measures. The mean of the two measures was calculated, and a paired  $t$  test was performed to study the variation between observers..

Using the data obtained, a descriptive statistic was created to ascertain the mean values of each of the variables. A Kolmogórov-Smirnov test was performed to study the distribution of the sample. A paired  $t$  test was performed to verify whether there were statistically significant differences between the right and left side, and on what side the highest values are found.

An independent two-sample  $t$  test was also performed to verify whether statistically significant differences existed between the two sexes and to be able to calculate classification intervals and classification functions in the talus and radius for each of the volumes. The classification intervals are obtained by the exhaustive Chi-Square Automatic Interactive detector method where data are separated in intervals on the basis of the best predictor of the dependent variable (sex). Several intervals are calculated in each operation before the most

significant is selected. They are useful to observe what percentage of the males and females in this study sample is distributed among the different intervals. The classification functions are calculated using Fisher's coefficients. A group of coefficients is obtained for each group, and each case is classified on the group where it has the highest discriminant punctuation. They offer the possibility to classify sex giving a correct classification percentage based on the study sample.

Finally, a validation test including all classification functions was performed on a sample of 20 individuals (10 males and 10 females) taken from another contemporary Spanish reference collection (twentieth century; EML 2) also located at the School of Legal Medicine of Madrid and formed by 88 individuals (63 males, 23 females, and 2 unknown) born between the years 1941 and 1976 and died in 1996.

## Results

The results of the descriptive analysis of the sample are shown in Table 2. For all of the variables, the mean values are higher in males than in females, though there is an overlapping range in which both sexes can be found.

The hypothesis that the sample did not follow a normal distribution was rejected because of the results obtained on the Kolmogórov-Smirnov test ( $p>0.05$ ). Parametric tests were then performed.

There were no statistically significant differences between the volumes calculated from the 3D image repetition process of a sample of 20 tali and 20 radii and the ones calculated first (tali, mean=0.03  $t=0.815$   $p=0.425$ /radii, mean=-0.344  $t=-1.242$   $p=0.229$ ).

There were no statistically significant differences ( $p>0.05$ ) between the two measures taken on each anatomical regions so the mean of both was calculated to minimize the possible errors. No statistically significant differences were found between the two measures taken by the second observer ( $p>0.05$ ), and no statistically significant differences were found between observers when comparing the volumes calculated on the different anatomical regions on a sample of 20 tali and 20 radii (Table 3).

**Table 2.** Statistics describing the talus and radius volumes (cm<sup>3</sup>) in males and females and side differences

MALE						FEMALE			
	Side	N	Mean	SD	<i>p</i> <sup>a</sup>	N	Mean	SD	<i>p</i> <sup>a</sup>
<b>Talus</b>									
Total volume	R	45	32.90	4.70	0.18	46	22.77	2.99	0.32
	L	40	32.80	4.33		48	22.80	3.28	
Anterior volume 1	R	45	6.83	1.19	0.004*	46	4.78	.71	0.01*
	L	40	6.44	1.09		48	4.58	.71	
Anterior volume 2	R	45	10.27	1.86	0.44	46	7.26	1.05	0.80
	L	40	10.06	1.41		48	7.24	1.09	
Anterior volume 3	R	45	6.62	1.55	0.61	46	4.68	.94	0.61
	L	40	6.48	1.28		48	4.68	1.05	
Posterior volume	R	45	19.28	2.84	0.1	46	13.15	1.87	0.92
	L	40	19.61	2.78		48	13.22	2.05	
<b>Radius</b>									
Total volume	R	32	42.15	5.61	0.03*	31	26.7	4.07	0.002**
	L	30	40.92	5.78		33	26.24	4.49	
Head volume	R	32	3.38	.72	0.07	31	2.23	.48	0.94
	L	30	3.35	.75		32	2.19	.52	
Diaphysis volume	R	32	29.03	3.17	0.006**	31	17.86	2.97	0.007**
	L	30	28.12	3.83		33	17.75	3.13	
Distal end volume	R	32	9.74	1.54	0.51	31	6.46	0.98	0.000**
	L	30	9.43	1.59		33	6.29	1.22	

<sup>a</sup>Level of significance of the paired *t* test to study side-based differences \**p*<0.05, \*\**p*<0.01

**Table 3.** Differences between observers

Observer 2-1	TALUS, <i>n</i> =20				RADIUS, <i>n</i> =20		
	Anterior volume 1	Anterior volume 2	Anterior volume 3	Posterior volume	Head volume	Diaphysis volume	Distal end volume
<b>Mean</b>	-0.054	-0.223	-0.004	0.082	0.036	0.022	-0.058
<b><i>t</i></b>	-0.524	-1.668	-0.064	0.553	1.087	0.203	-0.642
<b><i>p</i></b>	0.606	0.112	0.95	0.586	0.291	0.841	0.529

In the case of females, the paired *t* test shows that there are statistically significant differences depending upon side for the anterior volume 1, the total volume of the radius, the volume of the diaphysis, and the volume of the distal end, with the values for the right side being greater. In the case of males, there are statistically significant differences depending on side for the anterior volume 1, the total volume of the radius, and the volume of the diaphysis, with the values for the right side being greater. Because differences have been found

depending upon side for some of the variables, the data are presented with differentiation between the right side and left side.

**Table 4.** Classification intervals for talus volumes (cm<sup>3</sup>)

Talus	Side	Classification interval	%M <sup>a</sup>	%F <sup>b</sup>
Total volume	R	<=24.921	2.8	97.2
		<b>(24.921-29.676]</b>	<b>47.4</b>	<b>52.6</b>
		>29.676	97.2	2.8
	L	<=24.129	0	100
		<b>(24.129-28,526]</b>	<b>38.9</b>	<b>61.1</b>
>28,526		94.3	5.7	
Anterior volume 1	R	<=4.76	3.7	96.3
		<b>(4.76-5.135]</b>	<b>44.4</b>	<b>55.6</b>
		<b>(5.135-5.82]</b>	<b>31.58</b>	<b>68.42</b>
	L	>5.82	94.4	5.6
		<=5.52	13.2	86.8
>5.52		94.3	5.7	
Anterior volume 2	R	<=8.31	11.1	88.9
		>8.31	87	13
		<=8.232	6.8	93.2
	L	>8.232	84.1	15.9
		<=5.123	11.1	88.9
Anterior volume 3		R	<b>(5.123-5.805]</b>	<b>47.4</b>
	>5.805		88.9	11.1
	<=4.96		5.7	94.3
	L	<b>(4.96-5.594]</b>	<b>50</b>	<b>50</b>
		>5.594	82.9	17.1
<=13.130		0	100	
Posterior volume	R	<b>(13.130-17.265]</b>	<b>32.1</b>	<b>67.9</b>
		>17.265	100	0
		<=16.02	2.3	97.7
	L	>16.02	88.6	11.4

<sup>a</sup> Percentage of males on each interval    <sup>b</sup> Percentage of females on each interval

The independent two-sample *t* test shows statistically significant differences for each of the variables depending upon sex, with the values for males being greater. These differences make it possible to create intervals and classification functions.

The classification intervals determine a series of optimal intervals on the basis of which the sample is classified. The results for the talus are shown in Table 4, and the results for the radius in Table 5.

The classification functions are shown in Tables 6 and 7, thereby complementing the results of the classification intervals and making possible to determine sex adding a rate of accurate classification. For the talus, classification functions for total volume have been obtained which accurately classify 90.1 % of the sample for the right talus and 90.9 % for the left

talus. The total volume is the variable which offers a higher correct classification percentage, followed by the posterior volume.

**Table 5.** Classification intervals for radius volumes (cm<sup>3</sup>)

Radius	Side	Classification interval	%M <sup>a</sup>	%F <sup>b</sup>
<b>Total volume</b>	R	<=32.661	0	100
		>32.661	97	3
	L	<=32.500	3.3	96.7
		>32.500	93.5	6.5
<b>Head volume</b>	R	<=2.648	12.5	87.5
		>2.648	84.8	15.2
	L	<=1.941	0	100
		<b>(1.941-2.816]</b>	<b>36</b>	<b>64</b>
<b>Diaphysis volume</b>	R	<=22.884	0	100
		>22.884	97	3
	L	<=20.494	0	100
		<b>(20.494-24.397]</b>	<b>46.2</b>	<b>53.8</b>
<b>Distal end volume</b>	R	<=7.498	6.1	93.9
		>7.498	93.9	6.1
	L	<=7.478	10	90
		>7.478	87.1	12.9

<sup>a</sup> Percentage of males on each interval    <sup>b</sup> Percentage of females on each interval

For the radius, classification functions for total volume have been obtained which accurately classify 93.9 % of the sample for the right radius and 91.8 % for the left radius. These results indicate that radius volume is a good discriminant for sex and that sex can be determined with a high degree of reliability, exceeding the results achieved with the talus. The discriminant power of the head is less than that of total volume, but it must be taken into account in those cases in which one only has this region of the bone available. The diaphysis volume and the distal end volume of the right radius appear to be especially dimorphic offering classification functions that accurately classify 96.9 % and 95.5 % of the sample, respectively.

The results obtained on the validation test performed on a sample of 20 individuals (10 males and 10 females) from another Spanish reference collection (EML 2) are shown in table 8. The percentage of individuals correctly classified is given for each variable, obtaining the same results for the right and left side.

**Table 6.** Classification functions for talus volumes (cm<sup>3</sup>)

Talus	Side	Classification function		%CC <sup>1</sup>
Total volume	R	0.656(vol) – 18.271	> 0 Male < 0 Female	90.1
	L	0.694(vol) – 19.302	> 0 Male < 0 Female	90.9
Anterior volume 1	R	2.127(vol) – 12.346	> 0 Male < 0 Female	86.8
	L	2.279(vol) – 12.563	> 0 Male < 0 Female	88.6
Anterior volume 2	R	1.323(vol) – 11.601	> 0 Male < 0 Female	85.7
	L	1.828(vol) – 15.824	> 0 Male < 0 Female	89.8
Anterior volume 3	R	1.175(vol) – 6.640	> 0 Male < 0 Female	80.2
	L	1.348(vol) – 7.522	> 0 Male < 0 Female	79.5
Posterior volume	R	1.064(vol) – 17.249	> 0 Male < 0 Female	89
	L	1.098(vol) – 18.025	> 0 Male < 0 Female	89.8

<sup>1</sup> Percentage of correct classified**Table 7.** Classification functions for radius volumes (cm<sup>3</sup>)

Radius	Side	Classification function		%CC <sup>1</sup>
Total volume	R	0.650(vol) – 22.376	> 0 Male < 0 Female	93.9
	L	0.549(vol) – 18.458	> 0 Male < 0 Female	91.8
Head volume	R	3.072(vol) – 8.616	> 0 Male < 0 Female	76.9
	L	2.808(vol) – 7.78	> 0 Male < 0 Female	80.3
Diaphysis volume	R	0.975(vol) – 22.873	> 0 Male < 0 Female	96.9
	L	0.85(vol) – 19.512	> 0 Male < 0 Female	91.8
Distal end volume	R	1.976(vol) – 16.003	> 0 Male < 0 Female	95.5
	L	1.564(vol) – 12.296	> 0 Male < 0 Female	88.5

<sup>1</sup> Percentage of correct classified**Table 8.** Validation test

Talus	Total volume	Anterior volume 1	Anterior volume 2	Anterior volume 3	Posterior volume
CC <sup>1</sup>	90%	80%	85%	90%	90%
Radius	Total volume	Head volume	Diaphysis volume	Distal end volume	
CC <sup>1</sup>	95%	80%	95%	90%	

CC<sup>1</sup> percentage of individuals correctly classified with each variable

## Discussion

The talus and radius bones in the postcranial skeleton were selected to verify the discriminant power of the variable of volume. When bone remains are recovered, the pelvis and cranium are not always available for study, though their morphological study makes it possible to determine sex with a high rate of reliability. New studies on bones in the postcranial skeleton are necessary to verify the percentage of accurate classification which can be achieved on the basis of the study variables, taking into account both the bone in its entirety and in part, because bones are not always recovered in the best state of preservation.

3D scanning of the sample makes it possible to obtain a reproduction of the bone, which can be accessed from any location and through which many measurements can be taken. As a whole, they constitute a digital library of great value that includes a digitized copy of the original sample which is very useful if the original is lost or deteriorates.

One must bear in mind the limitations of these techniques when they are used because, among other issues, the image quality is conditional upon the scanning quality, which in turn depends upon the scanner and the selection of parameters performed by the professional when scanning the bone. Although no statistically significant differences have been found during the merging and the image processing, it is important to do these steps with the maximum possible precision. The fact that no statistically significant differences have been found between the two measures performed on the different anatomical regions and between observers confirms that there is a low variability performing the divisions, but it is necessary to take precautions with the orientation of the bone and the positioning of the points to minimize errors. The results obtained show a high level of discriminant power for the variable of volume in the talus and radius, with the ability to accurately classify from 90.9 to 96.9 % of the sample, the best results having been found using the radius.

The discriminant power of the anterior region of the talus is lower than that provided by total volume, but it would be useful in those cases in which the bone is incomplete and this region is well preserved. In the event that only the anterior region of the talus bone is available, an accurate classification can be achieved for 79.5 % to 89.8 % of the sample. In such cases, it is recommendable to consult the classification intervals to verify whether the volume calculated falls within an overlapping range or whether, on the contrary, the volume has a value for which there are only representatives of one of the two sexes.



As for the radius, the distal end turned out to be more discriminant than the proximal end, achieving an accurate classification of 95.5% of the sample. The diaphysis in the right radius has proven to be especially discriminant, given that the highest rate of accurate classifications was found for all of the variables, 96.9 %.

Observing the rates of accurate classification which take side into account, one can see that, in the case of the talus, there is hardly any difference between the two sides. However, the differences are more notable in the case of the radius. This coincides with the results found in the paired *t* test, in which statistically significant differences have been observed ( $p<0.05$ ) between the two sides for the total volumes, the diaphysis and the distal end of the radius, with the values for the right side being greater. For the talus, better results are obtained for the left side in four of five variables studied, for the radius, with a higher lateral asymmetry, better results are obtained for the right side in three of four variables studied.

The validation test confirms the discriminant power of this variable when applied to a sample from another contemporary Spanish reference collection (EML 2). The classification functions obtained in this study were only confirmed to be reliable for the Spanish population. Later comparative studies with other populations will be necessary to determine the variability between populations. As occurs with the classification functions based on metric variables, in order to be able to apply them to other populations, one must take into account the range of variation, ruling out their use in those cases in which the range of variability for each sex is different than that of the study sample herein.

## **Conclusions**

In 3D scanning of bone, special attention must be paid to the selection of parameters, the image's processing and the selection of anatomical divisions performed on the bone. From the results found, it can be concluded that the variable of volume is a good discriminant of sex in this study sample, accurately determining sex in 90.9 % of all cases, on the basis of the total volume of the left talus, and 93.9 % when using the total volume of the right radius. By calculating the volume in different anatomical regions, the diaphysis of the right radius has demonstrated a high discriminant power (CC=96.9 %) as well as the distal end (CC=95.5 %) both discriminating better than the total volume. The results found provide a reason to continue researching the discriminant power of this variable in other bones of the postcranial skeleton and calculate classification functions which can be used on the Spanish population

to determine sex in a reliable manner.

**Acknowledgments** We thank to the Computer Center of Universidad Complutense de Madrid the availability of the 3D scanner and we specially thank to Pedro Cuesta Álvaro the revision of the statistical study.

## References

- [1] Steel DG (1976) The estimation of sex on the basis of the talus and calcaneus. *Am J Phys Anthropol* 45: 581-588
- [2] Gualdi-Russo E (2007) Sex determination from the talus and calcaneus measurements. *Forensic Sci Int* 17: 151-156
- [3] Berrizbeitia EL (1989) Sex determination with the head of the radius. *J Forensic Sci* 34(5): 1206-1213
- [4] Barrier ILO, L'Abbé EN (2008) Sex determination from the radius and ulna in a modern South African sample. *Forensic Sci Int* 179: 85.e1-85.e7
- [5] Machado-Mendoza D, Pablo-Pozo J (2008) Estudio del dimorfismo sexual del radio en europoides cubanos. *Revista Española de Antropología Física* 28: 81-86
- [6] Singh S, Singh SP (1975) Identification of sex from tarsal bones. *Acta Anat* 93: 568-573
- [7] Todd TW, Kuenzel W (1925) The estimation of cranial capacity: a comparison of the direct water and seed methods. *Am J Phys Anthropol* 8(3): 251-259
- [8] Stewart, TD (1934) Cranial capacity studies. *Am J Phys Anthropol* 23 (3): 337-361
- [9] Uspenskii, S (1954) A new method for measuring cranial capacity. *Am J Phys Anthropol* 22: 115-117
- [10] Mackinnon L, Kennedy JA, Davies TV (1956) Estimation of skull capacity from Roentgenologic measurements. *American Journal of Roentgenology, Radium therapy and Nuclear medicine* 76 (2): 303-310
- [11] Jorgensen JB, Quaade F (1956) The external cranial volume as an estimate of cranial capacity. *Am J Phys Anthropol* 14(4): 661-664
- [12] Kaufman B, David CJ (1972) A method of infracranial volume calculation. *Invest Radiol* 7: 533-538
- [13] Olivier G, Tissier H (1975) Determination of cranial capacity in fossil men. *Am J Phys Anthropol* 43(3): 353-362
- [14] Mayhew TM, Olsen DR (1991) Magnetic resonance imaging (MRI) and model-fore brain estimates of forebrain volume determined using the Cavalieri principle. *J Anat* 178: 133-144

- [15] Steven RL (1992) Cranial capacity evolution in Homo Erectus and early homo sapiens. *Am J Phys Anthropol* 87(1): 1-13
- [16] Baab KL, McNulty KP (2008) Size, shape and asymmetry in fossil hominids: the status of the LB1 cranium based on 3D morphometric analyses. *J Hum Evol* 30: 1-15
- [17] Lorenzo C, Carretero JM, Arsuaga JL, Gracia A, Martínez I (1998) Intrapopulational body size variation and cranial capacity variation in Middle Pleistocen humans: The Sima de los huesos sample (Sierra de Atapuerca, Spain). *Am J Phys Anthropol* 106(1): 19-33
- [18] Butaric LN, McCarthy RC, Broadfield DC (2010) A preliminary 3D computed tomography study of the human maxillary sinus and nasal cavity. *Am J Phys Anthropol* 143(3): 426-436
- [19] Allen JS, Damasio H, Grabowski TJ (2002) Normal neuroanatomical variation in the human brain: An MRI-volumetric study. *Am J Phys Anthropol* 118(4): 341-358
- [20] Craig JG, Cody DD, Van Holsbeeck M (2004) The distal femoral and proximal tibial growth plates: MR imaging, three-dimensional modeling and estimation of area and volume. *Skeletal Radiol* 33: 337-344
- [21] Cicuttini F, Forbes A, Morris K, Darling S, Bailey M, Stuckey S (1999) Gender differences in knee cartilage volume as measured by magnetic resonance imaging. *Osteoarthritis cartilage* 7: 265-271
- [22] Faber SC, Eckstein F, Lukasz S, Muhlbauer R, Hohe J, Englmeier KH, Reiser M (2001) Gender differences in knee joint cartilage thickness, volume and articular surface areas: assessment with quantitative three-dimensional MR imaging. *Skeletal Radiol* 30: 144-150
- [23] Kranioti EF, Nathana D, Michalodimitrakakis M (2011) Sex estimation of the Cretan humerus: a digital radiometric study. *Int J Legal Med* 125: 659-667
- [24] Hsiao TH, Tsai SM, Chou ST, Pan JY, Tseng YC, Chang HP, Chen HS (2010) Sex determination using discriminant function analysis in children and adolescents: a lateral cephalometric study. *Int J Legal Med* 124: 155-160
- [25] Macaluso PJ (2011) Sex discrimination from the glenoid cavity in black South Africans: morphometric analysis of digital photographs. *Int J Legal Med* 125: 773-778
- [26] Sholts SB, Wärmländer S, Flores LM, Miller K, Walker PL (2010) Variation in the measurement of cranial volume and surface area using 3D Laser Scanning Technology. *J Forensic Sci* 55 (4): 871-875
- [27] Pretorius E, Steyn M, Scholtz Y (2006) Investigation into the usability of geometric morphometric analysis in assessment of sexual dimorphism. *Am J Phys Anthropol* 129:64-70
- [28] Bytheway JA, Ross AH (2010) A geometric morphometric approach to sex

determination of the human adult os coxa. J Forensic Sci 55(4): 859-864

[29] Giancoli D.C (1997) Física, principios con aplicaciones, Prentice Hall, New Jersey



## **5.2 ARTÍCULO 2**

**Determining sex with the clavicle  
in a contemporary Spanish reference collection:**

### **A STUDY ON 3D IMAGES**

*This chapter has been published as an original article in Forensic Sci Int (2016)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.01.029>*

**Determinación de sexo en la clavícula  
en una Colección de Referencia Española Contemporánea:  
UN ESTUDIO SOBRE IMÁGENES 3D**



## **Resumen**

El dimorfismo sexual basado en estudios métricos se ha determinado en poblaciones de diferentes orígenes y de diferentes épocas. Debido a la necesidad de conocer el dimorfismo sexual en población española para poder aplicar los resultados en el campo de la Antropología Forense se ha llevado a cabo un estudio sobre una muestra de población española contemporánea, compuesta por las clavículas derechas e izquierdas de 50 varones y 50 mujeres. Se ha realizado un estudio métrico, volumétrico y de curvas y para ello se ha escaneado en tres dimensiones toda la muestra utilizando el Picza 3D laser escáner, realizando finalmente el estudio sobre las reproducciones obtenidas. Se tomaron 6 medidas métricas y 4 medidas volumétricas utilizando el programa Geomagic y para el estudio de curvas se calculó un índice que relacionaba la longitud directa de la clavícula y la longitud proyectada sobre la superficie. Los datos se presentan para todas las variables, diferenciando entre lado derecho e izquierdo, habiendo procesado los mismos con el paquete estadístico PASW Statistics 18. Los resultados muestran que las funciones de clasificación que mejor categorizan la muestra con una única variable son las de las variables volumétricas, que clasifican correctamente el 94% de los casos utilizando el volumen de la diáfisis, seguido del volumen total que clasifica correctamente el 92% de los casos. El diámetro sagital en el punto medio de la diáfisis clasifica correctamente el 92% de los casos, el diámetro sagital en ese mismo punto lo hace en el 90% de los casos y la longitud máxima en el 88% de los casos. El índice de curvatura muestra que no hay diferencias estadísticamente significativas según el lado y el único índice de curvatura que presenta diferencias estadísticamente significativas según el sexo es la curva anterior total de la clavícula izquierda siendo esta más marcada en varones. La prueba de validación realizada sobre una muestra de 20 individuos confirma el alto poder discriminante de la variable volumen clasificando correctamente el 85-100% de la muestra dependiendo de la variable estudiada.

**Palabras clave:** Clavícula, escaneo 3D, volumen, dimorfismo sexual, población española





# **Determining sex with the clavicle in a contemporary Spanish reference collection: a study on 3D images**

## **Abstract**

Sexual dimorphism of the clavicle based on metric studies has been determined among different populations from different eras. Due to the need to know about sexual dimorphism in the Spanish population in order to apply the results to the field of Forensic Anthropology, a study has been carried out on a sample in the contemporary Spanish population, made up of the right and left clavicles of 50 males and 50 females. A metric, volumetric and curvature study was performed. To do so, 3D scanning was completed on the entire sample using the Picza 3D Laser Scanner, and the study was performed using reproductions. There were taken 6 metric measurements and 4 volumetric measurements using the Geomagic software, and for the study of curves, an index was calculated which related the direct length of the clavicle and its length as cast onto a surface. The data are presented for all of the variables, distinguishing between the right and left side, and there were processed using the statistical program PASW Statistics 18. The results show that the classification functions which best categorize the sample with an unique variable are volumetric, which classify the sample correctly in 94% of cases based on diaphysis volume, followed by total volume, which provides an accurate classification in 92% of all cases. The sagittal diameter at midshaft provides an accurate classification in 90% of cases and the maximum length in 88% of cases. The curvature index shows that there are no statistically significant differences by side and the only curvature index that shows significant differences by sex is the total anterior curve of the left clavicle being the males curve more pronounced. The validation study performed on a sample of 20 individuals confirms the high discriminatory power of the volume obtaining an accurate classification rate of 85-100% depending on the variable studied.

**Keywords:** Clavicle, 3D scanning, volume, sexual dimorphism, Spanish population, forensic anthropology population data

## **1. Introduction**

Studying the clavicle is of particular interest, it is the only bone in the shoulder girdle which forms a synovial joint with the torso, also being the only bone which connects the upper limb to the axial skeleton [1]. Moreover, the clavicle is the last bone to complete ossification, and

therefore it is of interest in terms of verifying whether this bone displays greater sexual dimorphism or asymmetry than others as a result of its late maturation.

Sexual dimorphism in the clavicle has been studied among different populations from different eras [2-12]. Most notable are the studies by Parsons, in which interest is shown not only in the metrics of the clavicle, but also in the differences in angle depending upon laterality and sex [13]. The volume of the clavicle has also been studied, though on few occasions. Most notable is the work by Singh and Jit [14] to study the volume of the clavicle, based on Archimedes' principle, calculating volume by the displacement of fluid. The study of the clavicle's asymmetry has aroused great interest in the field of Anthropology [15-21] also the study of clavicle's biomechanics in the field of Medicine [22-28], in the latter case with the objective of performing broader studies on variability in the clavicle to provide better treatment of fractures. The clavicle's curvature has also been studied by several authors [26, 29-33]. New lines of research aimed at the field of geometric morphometrics began to form in order to ascertain new information about sexual dimorphism of the clavicle and to discover whether results can be improved when determining sex by combining morphology and size [19,33].

The objective of this study is to contribute classification functions which help to determine sex on the basis of the clavicle in the Spanish population and to indicate what percentage of accurate classification is achieved when determining sex in this manner. In a forensic environment, it is not always possible to recover the full sample, and therefore there are cases in which very few skeletal remains are available. In these cases it is necessary to obtain the greatest possible information so it is essential to create specific classification functions for a population in order to determine sex in a reliable manner, or at least with awareness of the margins of error. Because of this, it is also important to carry out new studies to attempt to find variables on the basis of which better results may be obtained, so in this study the discriminatory power of the volume variable was studied, as well. Besides not always is it possible to recover the bone on a good state of preservation and some parts could be missed or damaged so having classification functions based on certain regions could be useful to determine sex in such cases. Also it is interesting to study the extent of their sexual dimorphism to know if there is some region with a higher sexual dimorphism. It has been subject to very little study, though it improves upon the results achieved using metric variables. Another hotly debated topic has been study of the clavicle's curvature [29,30,34],

and therefore in this study has been attempted to verify whether the right clavicle truly does display greater curvature than the left clavicle, establishing a relationship between the length of the clavicle and the length on the surface of the curve.

## **2. Material**

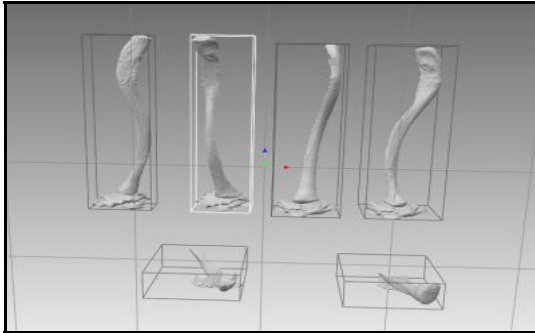
The study sample was obtained from two contemporary Spanish reference collections of the School of Legal Medicine of Madrid (Complutense University). The first is made up of 132 individuals born between the years 1881 and 1973 in different Spanish regions and died between the years 1975 and 1985, while the second collection is made up of 88 individuals born between the years 1941 and 1976 and died in 1996. In all, it was possible to recover the right and left clavicles of 100 individuals (50 males and 50 females) in a good state of preservation, for the study. For the validation study were taken into account those clavicles which were in good condition, but of which there was an odd number; in all, 20 clavicles (from 10 males and 10 females).

## **3. Methodology**

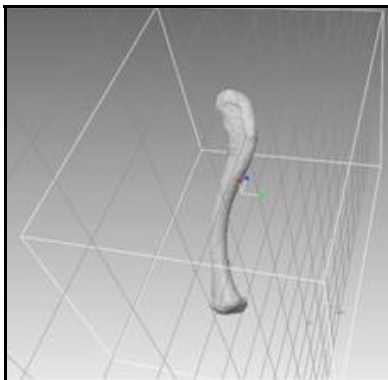
The methodology apply to this study has been very similar to the one applied on the previous published work about sex determination by talus and radii volumes [35]. The study sample underwent three-dimensional scanning to work with the resulting 3D reproductions. To do this, a PICZA 3D laser scanner was used, the mechanism of which consists of a rotating platform in the middle of which the clavicle is placed. A laser is projected from the right side, which gradually moves from its base to a set maximum height, while the surface of the bone is scanned. In order to scan the entire clavicle, it was necessary to perform 6 surface scans (corresponding to each of the 6 perspectives or views), changing the orientation of the clavicle each time. A rotating scan, which would have made it possible to scan almost the entire clavicle, could not be performed due to its morphology, which does not allow for proper scanning of the bone's contour. A distance between points of 0.4 mm was selected because this was considered to be the optimal option in terms of quality/time. The time needed to scan a clavicle ranges from 40 to 50 min. In order to join the 6 orientations together (Fig. 1), the software Pixform was used. To join 2 shells, it is necessary to manually mark 3 points in common between both orientations and then join the different meshes successively (Fig. 2). Each time 2 orientations are joined, the two shells are merged automatically to remove the overlapped regions between shells and to stitch the neighboring boundaries together with newly added faces. The time needed to obtain the whole image depends on the

expertise of the professional varying from 15 to 30 minutes. The result and accuracy of shells are still maintained after merging. Once the final 3D model is obtained it is necessary to remove spikes in order to straighten the surface by detecting and flattening single-point spikes. A low level smoothness has been chosen to not alter in excess the surface. The average of triangles for the 3D models has been 60.603 for female clavicles and 83.948 for male clavicles.

**Fig. 1** Orientations of rotating and slice scans of the clavicle

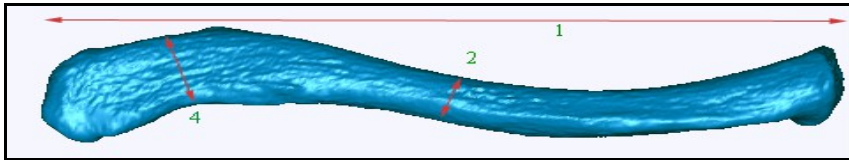


**Fig. 2** Assembled orientations of the clavicle

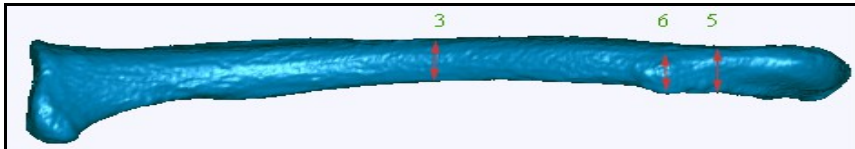


For the metric study, a total of 6 linear measurements were taken in the 3D reproductions of the bone. These were: maximum length, sagittal diameter at the midpoint of the diaphysis, vertical diameter at the midpoint of the diaphysis, sagittal diameter at the distal end, vertical diameter at the distal end and vertical diameter at the height of the conoid tubercle (Fig. 3 and Fig. 4). The description of the measurements is shown in Table 1. In order to take the measurements, the software Geomagic was used, which makes it possible to measure distances by positioning the two points which limit the measurement on the image.

**Fig. 3** Clavicle superior view. Metrical measurements 1-2-4



**Fig. 4** Clavicle posterior view. Metrical measurements 3-5-6



The measurements were taken twice with a time interval of 2 months in between. A paired t-test was carried out to verify that there were no statistically significant differences between the two measurements and the Technical Error Measurement was calculated to study the accuracy. Then the average was calculated between the two measurements, and these were the values which were used for the later studies. Of these 6 measurements, 3 were taken (1, 2 and 3) directly on the bone to verify that there were no statistically significant differences between the measurements taken on the bone and those taken in their 3D reproductions. Measurement (1) on the bone was taken using an osteometric board, whereas (2) and (3) were taken using a caliper.

The statistical studies completed were carried out using the statistical package PASW18. The first statistic that was completed was Kolmogorov-Smirnov's test to rule out that the sample did not follow a normal distribution. Because the sample was obtained from two collections an unpaired t-test was performed to check if there were statistical significant differences between them. A descriptive statistic was completed on the linear measurements to ascertain the mean, maximum and minimum values, dividing the results by sex. A paired t-test was performed to verify whether there were statistically significant differences between the variables of the right and left clavicles and to quantify the measurement error the Technical Error Measurement was calculated. An unpaired t-test was performed to verify whether there were statistically significant differences between the variables, bearing in mind sex, and last of all, a discriminatory analysis was performed to ascertain the discriminatory power of each

of the variables. The discriminatory analysis was completed in two ways: first a classification tree was created, which is better visually, because it displays classification intervals, and then discriminating functions were obtained, which classify the individual as a male or female in accordance with the result which is obtained when replacing the values of the variables in the equation.

Last of all, a validation study was carried out on a sample of 20 clavicles to ascertain the rate of accurate classification by the functions obtained in the prior study.

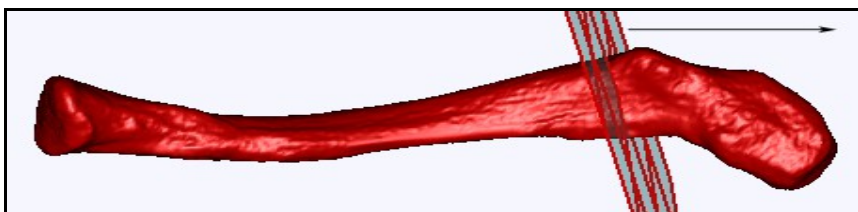
For the volumetric study, 4 volumes were measured: the total volume, the volume of the proximal end, the volume of the diaphysis and the volume of the distal end. The description of the measurements is shown in Table 1. In order to measure volume, the software Geomagic was used, which includes a tool that makes it possible to calculate the total volume and the volumes of parts, by carrying out plane divisions perpendicularly to the bone surface. The cutoff points are defined using two anatomical regions, the conoid tubercle (Fig. 6 and Fig. 7) and the impression for the costoclavicular ligament (Fig. 5 and Fig. 7). The same procedure and the same statistics were calculated as with the linear measurements, as well as the same validation study, on a sample of 20 clavicles (Figs. 8 and 9).

**Fig. 5** Clavicle inferior view



\*Proximal volume limited by the impression for the costoclavicular ligament

**Fig. 6** Clavicle inferior view



\*Distal volume limited by conoid tubercle

**Fig. 7** Clavicle inferior view



(1) impression for the costoclavicular ligament. (2) conoid tubercle

**Table 1.** Description of the measurements on the clavicle

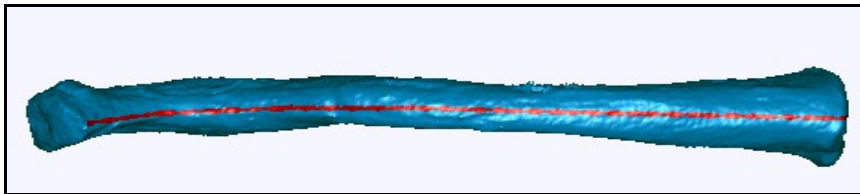
<b>Maximum length (1)</b>	Distance between the most proximal and distal ends of the clavicle
<b>Sagittal diameter at the midpoint of the diaphysis (2)</b>	Distance between the most anterior and posterior points of the clavicle at the midpoint of the diaphysis
<b>Vertical diameter at the midpoint of the diaphysis (3)</b>	Distance between the superior and inferior ends of the clavicle at the midpoint of the diaphysis
<b>Sagittal diameter at the distal end (4)</b>	Distance between the most anterior and posterior points of the clavicle at its distal end, coinciding with the apex of the external curve from a cranial view
<b>Vertical diameter at the distal end (5)</b>	Distance between the most superior and inferior points of the clavicle at its distal end, where the sagittal diameter was taken (4)
<b>Vertical diameter at the level of the conoid tubercle (6)</b>	Distance between the most superior and inferior points on the conoid tubercle
<b>Total volume (7)</b>	Volume of the clavicle in its entirety
<b>Proximal end volume (8)</b>	Volume of the proximal end of the clavicle, up to the impression for the costoclavicular ligament (Fig. 5)
<b>Diaphysis volume (9)</b>	Volume of the diaphysis, up to the conoid tubercle and the impression for the costoclavicular ligament
<b>Distal end volume (10)</b>	Volume of the distal end of the clavicle, up to the conoid tubercle (Fig. 6)
<b>Index of the total anterior curve from a superior view (11)</b>	Length of the clavicle's anterior curve / length projected onto surface of the clavicle's anterior curve (Fig. 8). Positioning the clavicle into an anterior view, the linear distance was measured, as well as the distance projected onto a surface between the most proximal and distal ends of the clavicle's total anterior curve
<b>Index of the total posterior curve from a superior view (12)</b>	Length of the clavicle's posterior curve / length projected onto surface of the clavicle's posterior curve (Fig. 9). Positioning the clavicle into a posterior view, the linear distance was measured, as well as the distance projected onto a surface between the most proximal and distal ends of the clavicle's total posterior curve



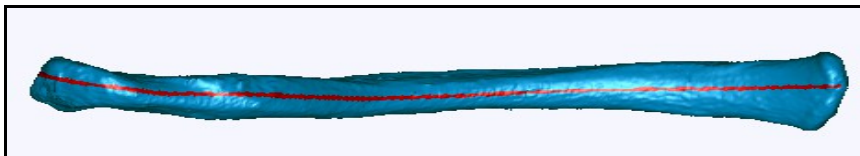
In order to study curvature, the decision was reached to calculate an index which would relate the direct length of the clavicle (linear distance between two points measured with a caliper or 3D tools) with the length of the curvature of the bone (the same length when projected onto a surface measured with a tape or 3D tools). This index was taken on two different curves, the total anterior curve and the total posterior curve. The description of the indices is shown in Table 1.

In order to calculate both the linear distance corresponding to the direct length of the clavicle and that same distance projected onto a surface, the software Geomagic was used. It includes a tool which makes it possible to calculate a distance between two points in both ways: in a linear manner and when projected onto a surface.

**Fig. 8** Clavicle anterior view. Total anterior curve



**Fig. 9** Clavicle posterior view. Total posterior curve



A descriptive statistical study was performed to show the medium values of indices separating the sample by sex and side. A paired  $t$ -test was performed to verify if there were statistically significant differences by side and an unpaired  $t$ -test to verify if there were statistically significant differences by sex.

A second observer measured the maximum length, the proximal end volume and the distal end volume on a sample of 20 clavicles. A paired  $t$ -test was performed to check if there were statistically significant differences between the measures taken by both observers.

#### 4. Results

The results found in the Kolmogorov-Smirnov test caused us to reject the hypothesis that the sample was not of a normal distribution ( $p > 0.05$ ), and therefore the later studies were performed using parametric tests. There were no statistically significant differences between collections ( $t > -0.801$   $p > 0.425$ ) so the sample was treated as a whole.

The results found in the paired  $t$ -tests show that there are no statistically significant differences between the two measurements taken on the bone and the two measurements taken on the 3D reproduction ( $p > 0.05$ ). The relative values of the Technical Error Measurement calculation shown in Table 2 are considered acceptable [37,38]. No statistically significant differences were found between the same measurements taken on the bone and the 3D reproduction, confirming the reliability of the measurements. The study was continued by calculating an average of the two measurements which had been taken on the same variable so as to minimize errors. No statistically significant differences are found between the same measurements taken by the two observers ( $p > 0.05$ ).

**Table 2.** Relative values of the Intra-evaluator TEM calculation (%)

	Maximum length	Sagittal diameter midshaft	Vertical diameter midshaft	Sagittal diameter distal end	Vertical diameter distal end	Vertical diameter lateral tubercle	Proximal volume	Diaphysis volume	Distal volume
<b>DRY BONE</b>									
<b>Right</b>	0.151	0.939	2.154						
<b>Left</b>	0.172	1.337	1.611						
<b>3D IMAGE</b>									
<b>Right</b>	0.143	2.081	2.978	1.47	3.463	2.499	4.795	4.663	2.833
<b>Left</b>	1.101	2.1	2.906	1.715	3.265	2.559	4.614	4.559	3.178

The results describing the metric and volumetric variables are provided in Table 3. This table also shows the results found in the paired  $t$ -test to ascertain whether there are statistically significant differences between right and left clavicles. The results show that the males display higher values for all of the variables, just as the right clavicles do, displaying higher values for all of the variables with the exception of maximum length and the sagittal diameter at distal end in males. These side differences are statistically significant in all cases with the exception of the metrical measurements of the distal end and the right diaphysis volume in males. The distribution of side differences in length is shown in Fig. 10.

**Table 3.** Statistics describing the clavicle linear measurements (mm.) and volumes (cm<sup>3</sup>) in males and females and side differences

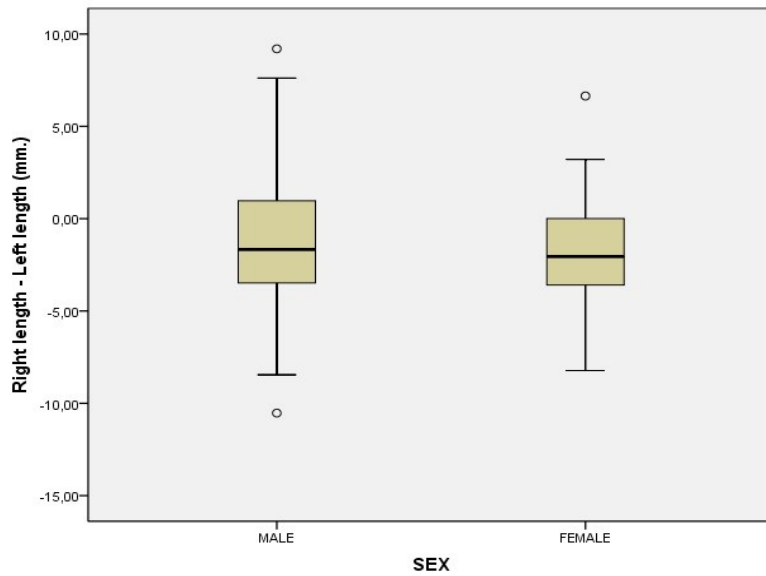
Clavicle	Side	MALE				FEMALE			
		N	Mean	SD	p <sup>†</sup>	N	Mean	SD	p <sup>†</sup>
Maximum length	R	50	149.97	10.19	0.011*	50	131.84	7.18	0.000**
	L	50	151.55	9.17		50	133.85	6.41	
Sagittal diameter midshaft	R	50	13.63	1.34	0.000**	50	11.12	1.16	0.000**
	L	50	12.9	1.22		50	10.42	1.01	
Vertical diameter midshaft	R	50	10.58	0.92	0.006**	50	8.64	0.99	0.029*
	L	50	10.26	1.05		50	8.43	0.88	
Sagittal diameter distal end	R	50	18.99	2.35	0.526	50	16.18	2.02	0.381
	L	50	19.16	2.23		50	16.01	2.21	
Vertical diameter distal end	R	50	9.74	1.5	0.138	50	8.27	1.43	0.156
	L	50	9.46	1.73		50	8.04	1.49	
Vertical diameter lateral tubercle	R	50	11.62	1.73	0.165	50	10.25	1.58	0.536
	L	50	11.39	1.95		50	10.15	2.01	
Total volume	R	50	25.62	4.1	0.001**	50	16.06	2.86	0.000**

	L	50	24.68	4.15		50	15.28	3.12	
<b>Proximal volume</b>	R	50	7.91	2.23	0.018*	50	5.35	1.42	0.034*
	L	50	7.5	2.01		50	5.09	1.45	
<b>Diaphysis volume</b>	R	50	9.92	1.61	0.249	50	5.75	1.12	0.034*
	L	50	9.74	1.81		50	5.5	1.18	
<b>Distal volume</b>	R	50	7.79	1.61	0.016*	50	4.96	1.07	0.013*
	L	50	7.44	1.56		50	4.7	1.23	

<sup>1</sup>Level of significance of the paired-t test to study side-based differences \*p<0.05 \*\*p<0.01

The independent two-sample *t*-test showed how the differences between males and females were statistically significant ( $p < 0.01$ ) for the metric and volumetric variables, and therefore intervals were calculated that were determined using classification trees which are shown in Table 4. Classification functions were also calculated and are shown in Tables 5 and 6 respectively, indicating the percentage of accurate classification using each of the variables. Both methods can be used interchangeably to classify a sample but best results are obtained using the classification intervals. The best variables on the basis of which classification functions are determined with the highest rate of accurate classification of cases are right diaphysis volume, which provides an accurate classification in 94% of all cases, followed by the total volume (92% of all cases classified accurately) and then the right sagittal diameter at midshaft (90% of all cases classified accurately) and right maximum length (88% of all cases classified accurately). The results determined on the basis of proximal volume and distal volume are better than those obtained with the metric variables of the distal end. The combination of the different volumetric variables does not improve the results obtained using the variables independently. The combination of the 6 different metrical measurements correctly classifies the 95% of the sample. The best results are obtained combining all variables, except total volume, correctly classifying the 96% of the sample.

**Fig. 10** Differences between right and left clavicle length (mm.)



**Table 4.** Classification intervals for clavicle metrical measurements (mm.) and volumes (cm<sup>3</sup>)

Clavicle	Side	Classification interval	%M <sup>1</sup>	%F <sup>2</sup>	%CC <sup>3</sup>
<b>Maximum length</b>	R	<=144.97 >144.97	18.3 97.5	81.7 2.5	88
	L	<=144.412 <b>(144.412-149.86]</b> >149.86	20 <b>80</b> 100	80 <b>20</b> 0	86
<b>Sagittal diameter midshaft</b>	R	<=12.278 <b>(12.278-12.675]</b> >12.675	22 <b>30</b> 90	78 <b>70</b> 10	90
	L	<=11.58 >11.58	12 88	88 12	88
<b>Vertical diameter midshaft</b>	R	<=8.695 <b>(8.695-10.092]</b> >10.092	3.3 <b>40</b> 92.5	96.7 <b>60</b> 7.5	84
	L	<=8.67 <b>(8.67-10.075]</b> >10.075	7.5 <b>63.3</b> 93.3	92.5 <b>36.7</b> 6.7	84
<b>Sagittal diameter distal end</b>	R	<=18.432 >18.432	26.7 85	73.3 15	78
	L	<=17.67	22	78	78

		>17.67	78	22	
Vertical diameter distal end	R	<=9.238	28	72	72
		>9.238	72	28	
		<=7.617	23.3	76.7	
	L	(7.617-9.682]	<b>50</b>	<b>50</b>	66
		>9.682	76.7	23.3	
Vertical diameter conoid tubercle	R	<=11.276	31.7	68.3	72
		>11.276	77.5	22.5	
		<=10.768	32	68	
	L	>10.768	68	32	68
Total volume	R	<=17.882	0	100	92
		(17.882-20.23]	<b>40</b>	<b>60</b>	
		>20.23	92	8	
		<=18.52	8	92	
	L	>18.52	92	8	92
Proximal volume	R	<=6.689	23.3	76.7	82
		>6.689	90	10	
		<=4.36	5	95	
	L	(4.36-6.386]	<b>37.5</b>	<b>62.5</b>	78
		>6.386	85	15	
Diaphysis volume	R	<=6.322	0	100	94
		(6.322-7.513]	<b>30</b>	<b>70</b>	
		>7.513	94	6	
		<=6.938	8	92	
	L	>6.938	92	8	92
Distal volume	R	<=6.02	14	86	86
		>6.02	86	14	
		<=4.643	3.3	96.7	
	L	(4.643-6.255]	<b>40</b>	<b>60</b>	84
		>6.255	92.5	7.5	

<sup>1</sup> Percentage of males on each interval   <sup>2</sup> Percentage of females on each interval   <sup>3</sup> Percentage of correct classified

**Table 5.** Classification functions for clavicle metrical measurements (mm.)

Clavicle	Side	Classification function		Wilk's $\lambda$	%CC'
Maximum length (1)	R	0.233(1) – 32.897	> 0 Male < 0 Female	0.481	80% Males 92% Females
	L	0.282(1) – 40.353	> 0 Male < 0 Female	0.439	80% Males 90% Females
Sagittal diameter midshaft (2)	R	1.592(2) – 19.703	> 0 Male < 0 Female	0.496	78% Males 78% Females
	L	1.971(2) – 22.986	> 0 Male < 0 Female	0.444	84% Males 88% Females
Vertical diameter midshaft (3)	R	2.135(3) – 20.523	> 0 Male < 0 Female	0.486	84% Males 84% Females
	L	1.948(3) – 18.203	> 0 Male < 0 Female	0.523	80% Males 86% Females
Sagittal diameter distal end (4)	R	0.583(4) – 10.256	> 0 Male < 0 Female	0.706	74% Males 78% Females
	L	0.639(4) – 11.241	> 0 Male < 0 Female	0.661	80% Males 76% Females
Vertical diameter distal end (5)	R	0.691(4) – 6.218	> 0 Male < 0 Female	0.794	72% Males 64% Females
	L	0.542(4) – 4.741	> 0 Male < 0 Female	0.836	60% Males 70% Females
Vertical diameter lateral tubercle (6)	R	0.5(4) – 5.466	> 0 Male < 0 Female	0.851	66% Males 70% Females
	L	0.317 (4) – 3.415	> 0 Male < 0 Female	0.909	68% Males 66% Females
1+2+3+4+5+6	L	0.195(1)+1.632(2)+1.447(3)+0.377(4)+0.6(5)-0.76(6) -64.125	> 0 Male < 0 Female	0.258	94% Males 96% Females
1+2+3	L	0.225(1)+1.429(2)+1.317(3) -61.079	> 0 Male < 0 Female	0.283	94% Males 94% Females
1+2+3	R	0.229(1)+1.034(2)+1.762(3) -62.062	> 0 Male < 0 Female	0.278	92% Males 94% Females
1L+2L+3R	R+L	0.253(1)+1.196(2)+ 1.677(3) -66.093	> 0 Male < 0 Female	0.268	94% Males 94% Females

<sup>1</sup> Percentage of correct classified

**Table 6.** Classification functions for clavicle volumes (cm<sup>3</sup>)

Clavicle	Side	Classification function	Wilk's $\lambda$	%CC <sup>1</sup>
<b>Total volume (7)</b>	R	0.766(7) – 15.959 > 0 Male < 0 Female	0.349	90% Males 94% Females
	L	0.697(7) – 13.928 > 0 Male < 0 Female	0.374	88% Males 94% Females
<b>Proximal volume (8)</b>	R	0.733(8) – 4.864 > 0 Male < 0 Female	0.676	76% Males 90% Females
	L	0.782(8) – 4.925 > 0 Male < 0 Female	0.676	70% Males 86% Females
<b>Diaphysis volume (9)</b>	R	2.165(9) – 16.954 > 0 Male < 0 Female	0.303	92% Males 94% Females
	L	1.823(9) – 13.888 > 0 Male < 0 Female	0.337	88% Males 96% Females
<b>Distal volume (10)</b>	R	1.511(10) – 9.633 > 0 Male < 0 Female	0.479	76% Males 90% Females
	L	1.391(10) – 8.438 > 0 Male < 0 Female	0.507	80% Males 90% Females
<b>9R+7R+6L</b>	R+L	1.613(9R)+0.461(7R)-0.452(6L) -17.372 > 0 Male < 0 Female	0.271	88% Males 96% Females
<b>9R+2L+6L</b>	R+L	1.932(9R)+0.985(2L)-0.403(6L) -22.272 > 0 Male < 0 Female	0.282	90% Males 96% Females
<b>1R+1L+2R+2L+3R+ 3L+4R+4L+5R+5L+ 6R+6L+8R+8L+9R+ 9L+10R+10L</b>	R+L	-0.017(1R)+0.230(1L)+0.063(2R)+ 1.218(2L) +0.432(3R)+0.841(3L)-0.294(4R) +0.58(4L) +0.259(5R)+0.477(5L)+0.508(6R)-0.942(6L) +0.183(8R) +0.06(8L) +1.146(9R)-0.229(9L) +0.125(10R)-0.794(10L)-65.242 > 0 Male < 0 Female	0.231	96% Males 96% Females

<sup>1</sup> Percentage of correct classified

The results for the curvature indices are shown in Table 7. Index values more distant from 1



indicate a greater curvature. The results show that posterior curve (Fig. 6) is greater than the anterior (Fig. 5) being the differences statistically significant ( $p < 0.05$ ). The medium values of the posterior curve index shows that right side is more curved than left and that females posterior curve is greater than males but these differences are not statistically significant. The medium values of the anterior curve index shows that right side is more curved than left in females but not in males, being both differences not statistically significant. In this case males curve is greater than females being the differences statistically significant on the left side. 70 out of 100 clavicles have right clavicle shorter than the left (33 males and 37 females). Although the differences are not statistically significant 12 out of 33 males have a greater right anterior and posterior curve, 6 out of 33 have a greater right posterior curve and 7 out of 33 have a greater right anterior curve. 10 out of 37 females have a greater right anterior and posterior curve, 10 out of 37 have a greater right posterior curve and 13 out of 37 have a greater right anterior curve. 30 out of 100 clavicles have left clavicle shorter than the right (17 males and 13 females). 5 out of 17 males have a greater anterior and posterior curve, 2 out of 17 have a greater posterior curve and 4 out of 17 have a greater anterior curve. 3 out of 13 females have a greater anterior and posterior curve, 2 out of 13 have a greater posterior curve and 4 out of 13 have a greater anterior curve.

**Table 7.** Curvature indices

Clavicle	Side	MALE			FEMALE			p <sup>1</sup>
		N	Mean	SD	N	Mean	SD	
<b>Total posterior curve</b>	R	50	0.8972	0.024	50	0.8946	0.022	0.574
	L	50	0.8988	0.024	50	0.8949	0.02	0.390
<b>Total anterior curve</b>	R	50	0.9455	0.019	50	0.9517	0.021	0.12
	L	50	0.9446	0.025	50	0.9534	0.013	0.032*

<sup>1</sup>Level of significance of the unpaired-t test to study sex-based differences \* $p < 0.05$

The results of the validation test performed on a sample of 20 clavicles (10 males and 10 females) are shown in Table 8. The variables which best classified the sample were that of total volume and diaphysis volume, which accurately classified 100% of the cases. With the metric variables, the best results are achieved using indistinctively the maximum length, the

sagittal and vertical diameters at midshaft, which accurately classified 90% of the cases. The results obtained confirm the reliability of applying these formulas to Spanish population.

**Table 8.** Validation test

<b>CLAVICLE</b>	<b>Maximum length</b>	<b>Sagittal diameter midshaft</b>	<b>Vertical diameter midshaft</b>	<b>Sagittal diameter distal end</b>	<b>Vertical diameter distal end</b>	<b>Vertical diameter lateral tubercle</b>
<b>CC<sup>1</sup></b>	90	90	90	75	70	70
<b>CLAVICLE</b>	<b>Total volume</b>	<b>Proximal volume</b>	<b>Diaphysis volume</b>	<b>Distal volume</b>		
<b>CC<sup>1</sup></b>	100	85	100	90		

CC<sup>1</sup> percentage of individuals correctly classified with each variable

## 5. Discussion

One of the advantages of 3D scanning the sample is that a reproduction of the bone is obtained, as a whole, it constitutes a digital library that includes a digitized copy of the original sample which is very useful if the original is lost or damaged. It can also be accessed from any location which allows doing comparative studies with other populations without moving and their study is clean, fast and reliable. In this study has offered the opportunity to calculate the volume automatically and easily which is a big step because the limitation of calculating it in a reliable manner had not allowed studying its discriminatory power.

The results found show that the clavicle can be used to determine sex quite reliably, achieving rates of accurate classification of approximately 96%. Most of the studies which analyze the discriminatory power of the clavicle have done so on the basis of metric studies, finding results which ranged from 85% to 93% depending on the population studied using maximum length [2-8, 10-12]. One of the advantages of presenting classification intervals for each variable is that it is possible to know the overlapping region where is difficult to assign sex with reliability. This fact is important for practitioners in terms of reaching a decision.

For comparison with other populations, the main measurement that could be compared was that of maximum length, the average of the Spanish population being below the others, with the exception of the populations of India, Guatemala, Nepal, Gujarat and Iran, in which the average values are higher in the Spanish population [2-8,10,13]. The sagittal and vertical diameters at midshaft could be compared with three populations, American Black, American White [6] and Cretans [9] being greater on the first and more similar with the measures of the

third group. Comparing with American White sagittal diameter is greater in Spanish population but vertical diameter value is lesser. If the length cut-off values of these populations are used to assign sex in the present sample the accuracy rates are 75-80% in case of using the American Black cut-off values, 82-85% using the American White cut-off values, 77-84% using the Iranian cut-off values, 87-88% using the modern English clavicles cut-off values and 88-89% using the cut-off values for Greek population. Using the cut-off values for American Black sagittal diameter the accuracy rate is 69-80%, for American Black vertical diameter is 79-85%, for the American White sagittal diameter is 84-86%, and for American White vertical diameter is 79-85%. The variability in the results depending on the population data used confirms the need of having specific functions for each population to minimize the errors determining sex.

For volume, only one study has been found [14], completed on the population of India, in which the volumes of the clavicle in males ranged from 9.3 to 33.9 ml on the right side and from 9.4 to 33 ml on the left, and in females from 7.5 to 20.40 ml and from 7 to 20 ml, for the right and left sides, respectively. In the case of the Spanish population, the values calculated vary among males from 18 to 39 ml on the right side and from 16.824 to 36.815 ml on the left side, and in females from 9.996 to 26.18 ml on the right side, and from 10.298 to 25.105 ml on the left side. The values in the Spanish population are higher than those of the Indian population studied, coinciding with the differences which were also found in the metric measurements, and therefore specific population studies are needed to be able to discriminate sex with a higher success rate.

It has been observed that both the proximal region and the distal region of the clavicle offer similar results when one intends to determine sex on the basis of its volume, although better results are obtained with the distal volume. The volume of the diaphysis is one of the 3 regions which provide the best results. Of the metric variables, those taken at the midpoint of the diaphysis discriminate better than the three at the distal end, the best being the sagittal diameter at midshaft. The results obtained determining sex by the three metric measurements at the distal end are not as good as the results obtained by the distal volume, so this last variable is more reliable to sex determination. Considering the results obtained by volume and metrics the diaphysis appear to be the most dimorphic part of the clavicle.

There is a set of variables which could be influencing, to a greater or lesser degree, the

differences which are found between males and females: the amount of muscle, the level of physical activity performed and the level of bone quantity-quality. One must bear in mind that the different regions in the clavicle display different muscular and ligament entry points, and therefore each region is subject to different forces. At the distal end, the acromioclavicular joint is kept in place by 4 ligaments: the superior ligament, inferior ligament, conoid ligament and trapezoidal ligament. The conoid ligament keeps the angle formed by the two bones (clavicle-scapula) from opening and the trapezoidal ligament keeps it from closing [36]. Located in the diaphysis is the subclavius muscle, which leads from the inferior face of the clavicle (central portion) to the superior face of the first rib and the first costal cartilage. Its role is to make the clavicle move downward, and it is an active ligament in the sternoclavicular joint [36]. Also entering into the diaphysis is the occipital sternocleidomastoid muscle, which joins the cranium with the internal part of the clavicle and the sternum. If the cranium is the fixed point, it raises the sternum and the internal part of the clavicle; it therefore provides upward lift. The trapezium has three shafts and it is the superior shaft which ends at the posterior edge of the clavicle (external third) and the acromion. The superior trapezium is required in excess when it is exerted using the superior limb in suspension, as when typing [36]. The pectoralis major muscle originates in the clavicle (in the internal 2/3 of the anterior edge), all along the sternum and the costal cartilage. If the fixed point is the rib cage, the set of fibers perform adduction of the arm and its internal rotation. This muscle is required, for example, when hugging or in brachial suspension [36]. The deltoid muscle is divided into three shafts and the anterior shaft is the one that enters into the clavicle (external third of the anterior edge). The anterior shaft performs the antepulsion and internal rotation of the arm, the medial shaft performs abduction of the arm, and the posterior shaft performs the arm's retropulsion [36].

Between males and females there are differences at the muscular level, and considerable variation is found between the lengths and diameters of the fibers in adults. The skeletal muscular fibers grow in length and diameter from birth until adulthood, with a fivefold increase in their size during this time period. The activity performed by the individual it is also influencing. The increase in muscle size due to resistance training leads to an increase in the diameter of fibers more than in their number. This number is determined genetically and varies from one person to the next. The diameter of the fibers may also be increased by resistance training and also the bone responds dynamically to the presence or absence of forces with changes in size, shape and density. It appears that the larger the forces and loads

which regularly act are, the more dramatic the increase in the bone's mineralization is. It is the magnitude of the skeleton's load more than the frequency of bearing loads which is related with the bone's mass [39].

Asymmetry in the clavicle with respect to the greater length that left clavicles appear to display has been described in different populations. Olivier had already described it in 1951 [29]. Mays et al. [17], Auerbach and Raxter [18] concluded that the asymmetry in the clavicle was due above all to differences in activity patterns and in behavior in bearing loads, with the diameters measured on the diaphysis being more sensitive than length to the effect of bearing loads. The sole path for development of the clavicle may also play a role in the atypical pattern of asymmetry observed in the clavicle. Auerbach and Raxter [18] also described the right clavicles asymmetry in the diaphysis, the parameters studied in the latter being greater than in the right clavicles.

Asymmetry was also studied in fetal bones by Mohsin et al. [20], who did not find variations based on laterality for most of the parameters considered. The diameters and circumference in the diaphysis are the only parameters which displayed significant differences, but only in certain groups of fetuses, and therefore the clavicle's growth and development in intrauterine life appears to be a practically symmetrical phenomenon, whereas the bilateral variations which are observed in adult clavicles appear to be due to factors which play a role after birth.

According to Trinkaus et al. [16], the asymmetries are more notable in the widths of the diaphysis than in the length, and the widths of the diaphysis are more sensitive to loads than the lengths. Therefore, a closer concordance would be expected in the asymmetries of widths, if the elements are subjected to similar load magnitudes. The clavicle acts as a functional component of the upper limb, in which the differences in activity play an important role [17], having found differences between the various groups studied (farmers, hunter-gatherers and industrial workers). It is also believed that the differences in clavicle length could be due to the fact that clavicle growth is delayed due to repeated axial compression of the upper limb during primary growth.

In his studies, Papaionnoau et al. [8] obtained the best results in terms of accurate classification using the maximum length and circumference at the midpoint of the diaphysis. In his work, he discusses how sexual dimorphism has frequently been attributed to

differences in activity patterns, when in actuality the correlation of muscular markers appears to be greater with body size than with sex. It is also believed that the differences may be related to a combination of diet and the sexual division of labor in the recent past.

In his studies on the clavicle, Rios [4] concludes that the result of the morphological differences observed between the sexes is due to genetic and environmental factors which affect growth and development. The length of the clavicle is to be classified as an intermediate-late growth variable, and the minimum diameter of the clavicle as an intermediate-very late variable. There is a significant relationship between the growth pattern and sexual dimorphism in the human skeleton. The parts with earlier growth are generally less sexually dimorphic than the elements that undergo late growth. The increase in robustness in the skeleton, measured by growth in clavicle diameter, continues in adult life and is not constrained by the fusion of the epiphysis. One could say that adult size is first reached, and then the increase in postcranial skeletal robustness occurs, in what is the last stage of human growth. A different pattern of activity between the sexes which involves differential mechanical stress on the shoulder girdle may explain part of the sexual dimorphism found.

In reference to clavicle curvature Kaur et al. [30] has reported that males' bones are more curved than those of females in different populations, and that the length of the left clavicle was greater than that of the right, arguing that with use of the right hand, the right clavicle's curve in adults would become more notable than the left clavicle's, and this would cause the right clavicle to become shorter.

In this study, all of the variables determined, both metric and volumetric, are greater in males and on the right side, with the exception of maximum length and sagittal diameter at the distal end in males. In the last case these differences are not statistically significant. The differences by side found in the metric measurements taken on the distal end are not statistically significant. This contrasts with the distal volume which differences are statistically significant by side. In this last case it is considered the whole region of the distal part which shows differences by side, but with the metric measurements there are considered only specific points of this region which in this sample do not show differences by side. More studies will be needed to know what part or parts of the distal region are contributing to the dimorphic differences by side found in the distal volume.

The diaphysis seems to display greater dimorphism than the proximal and distal regions of the clavicle, among both males and females. Better results are obtained using classification intervals for the diaphysis volume and also for the diameters at midshaft. It is curious that in males there are no statistically significant differences by side in the diaphysis volume but there are in the diameters so further studies will be necessary to study the different parts of the diaphysis because the central region appears to have differences by side. The action by the muscles of the proximal and distal regions, would influence the curved morphology of the bone and would add tension to the medial portion of the bone, fomenting its remodeling by increasing its robustness in response to this stress [35]. This could explain the differences by side found in the diameters because this central region is suffering special stress which would be greater in the predominant limb.

The curve of the human clavicle is typical and differs from that of other primates. In general, comparing the degree of asymmetries between humans and other primates (apes and monkeys), it has been seen that the percentage distribution and relative quantity of asymmetries in the clavicle and in the long bones of the upper end differ especially, but this is not so at the lower end, where the differences found are similar [15]. In the study of curvature indices, it has been found that the anterior and posterior curve does not show statistically significant differences by side but that clavicles which are shorter have the two curves or one of them more pronounced (75% in males / 89% in females when the right clavicle is shorter and 65% in males / 69% in females when the left clavicle is shorter). The only statistically significant difference is found in the left anterior curve being this curve greater in males. Entering at the proximal end is the distal portion of the pectoralis major and the costoclavicular ligament, which is a powerful stabilizer, and entering at the distal end are the trapezium and deltoid muscles. Pectoralis major enters the diaphysis in its anterior portion covering 2/3 parts of the anterior curve so this region is specially suffering the action of this muscle and could influence remodeling curve's shape increasing its curvature. In males volume diaphysis results show less bilateral asymmetry than in females so if anterior region do as well, this could explain why only the left side shows statistically significant differences by sex.

Shirley [35] and Fatah et al. [19] found that the differences in terms of length were more notable in males than in females. On the other hand, as for the remaining differences, they

were more notable in females, with the exception of the contours of deltoid origin and the entry of the trapezium at the distal end, where the differences are more notable in males. They also found that the most significant differences in both sexes were found at the lateral end on its superior surface, in the diaphysis on its inferior surface, and at the medial end on its anterior surface. Most of these locations are muscular entry sites. The entry sites which are found to be significant areas of asymmetry are the pectoralis major and the anterior portion of the deltoid, as well as the inferior portion of the subclavius. There is also an area on the posterior portion of the diaphysis which displays significant differences, and in males another small region at the medial end. Undoubtedly geometric morphometric studies of this type in the present sample would add more information about which specific regions have more dimorphism by side and sex and compare these differences among populations.

The results found in prior studies and in this study seem to confirm that the left clavicle is longer than the right clavicle, but that the latter is more robust. The clavicle normally acts like a support for attachment and conveys forces axially from the upper limb to the thorax. The reasons why right clavicles are shorter may be related with an increase in the compression forces on the shoulder girdle of the dominant side [17] which could increase the curvature and bring the two ends nearer or produce an earlier bony union of the epiphysis [13]. Also adding to these differences on one side could be the differences in muscular development associated with the predominance of one limb over the other, or the tendency to favor one side over the other when completing daily tasks [40]. The differences in length could also be correlated with the asymmetrical development of the areas where the trapezoid and costoclavicular ligaments are joined. The trapezoid ligament plays a predominantly restrictive role in the movement of the acromioclavicular joint during axial compression, with large amounts of force, whereas the costoclavicular ligament limits both the lifting of the pectoral belt and the upward displacement of the medial end of the clavicle. Those clavicles in which these ligaments suffered greater tension also tended to be the shorter side [17].

## **6. Conclusions**

Volume turned out to provide the greatest discriminatory power, with right diaphysis volume being the variable which best determines sex using the clavicle, accurately classifying 94% of all cases, followed by the total volume, which accurately classifies 92% of all cases.

Of the metric variables, that which best determines sex is right sagittal diameter at midshaft,



accurately classifying 90% of all cases, followed by the right maximum length, which accurately classifies 90% of all cases.

Left clavicles are of greater length than right clavicles, though the latter are more robust. The curvature indices reveal that right clavicles have a more pronounced posterior curve in males and females and a more pronounced anterior curve in females but these differences are not statistically significant. The only statistically significant difference between sexes has been found in the left anterior curve being that of males more curved than females.

Both the final morphology and the differences found between males and females could be due to a convergence of factors of a genetic and environmental nature. The stress and tension which act on the bone lead to changes which affect both the surface and the mineral content. These changes occur gradually throughout growth and life. The bone's response to the stress and tension to which it is subjected will be different depending upon the bone's resistance, which is different for each individual and for each of the sexes.

#### **Acknowledgments**

We would like to thank the Calculation Center of the Universidad Complutense of Madrid for having made the Picza 3D laser scanner and the software to be able to perform the three-dimensional scanning available to us.

#### **References**

1. A.E. Ljunggren, Clavicular function. *Acta orthop. Scand.* 50 (1979) 261-268.
2. I. Jit, S. Singh, The sexing of the adult clavicles. *Indian J. Med. Res.* 54(6) (1966) 551-571.
3. J.P. Patel, R.K. Shah, S.P. Merchant, A.B. Nirvan, G.V. Shah, Sexing of the human adult clavicle in Gujarat zone. *Gujarat Medical Journal* 64(2) (2009) 40-46.
4. L. Ríos Frutos, Determination of Sex from the Clavicle and Scapula in a Guatemalan Contemporary Rural Indigenous Population. *Am. J. Forensic Med. Path.* 23(3) (2002) 284-288.
5. I.L.O. Barrier, Sex determination from the bones of the forearm in a modern South African sample. Master these. University of Pretoria, 2007.
6. M.K. Spradley, R.L. Jantz, Sex Estimation in Forensic Anthropology: Skull Versus Postcranial Elements. *J. Forensic Sci.* 56(2) (2011) 289-296.
7. M.K. Haque, D.I. Mansur, A. Krishnamurthy, R. Karki, K. Sharma, R. Shakya, Morphometric Analysis of Clavicle in Nepalese Population. *Kathmandu Univ. Med. J.* 9(3)

35 (2011) 193-197.

8. V.A. Papaioannou, E.F. Kranioti, P. Joveneaux, D. Nathena, M. Michalodimitrakis, Sexual dimorphism of the scapula and the clavicle in a contemporary Greek population: Applications in forensic identification. *Forensic Sci. Int.* (2012) 217:231.e1-231.e7.
9. P.S. Bhusareddi, K.V. Padeyappanavar, Sex determination of adult human clavicles by various anthropometric measurements. *Anatomica Karnataka* 6(2) (2012) 56-62.
10. M. Akhlaghi, B. Moradi, M. Hajibeygi, Sex determination using anthropometric dimensions of the clavicle in Iranian population. *J. Forensic Leg. Med.* 19 (2012) 381-385.
11. M.L. Tise, M.K. Spradley, B.E. Anderson, Postcranial sex estimation of individuals considered hispanic. *J. Forensic. Sci.* 58(S1) (2013) S9-14. Doi: 10.1111/1556-4029.12006.
12. J. Albanese, A method for estimating sex using the clavicle, humerus, radius and ulna. *J Forensic Sci* 58(6) (2013) 1413-1419.
13. F.G. Parsons, On the proportions and characteristics of the modern English clavicle. *J. Anat.* 51 (1916) 71-93.
14. D. Singh, I. Jit, Identification of sex from the volumen of the clavicle. *J. Anat. Soc. India* 45(2) (1996) 119-124.
15. A.H. Schultz, Proportions, variability and asymmetries of the long bones of the limbs and the clavicles in man and apes. *Hum. Biol.* 9(3) (1937) 281-328.
16. E. Trinkaus, S.E. Churchill, C.B. Ruff, Postcranial robusticity in Homo. II: Humeral bilateral asymmetry and bone plasticity. *Am. J. Phys. Anthropol.* 93 (1994) 1-34.
17. S. Mays, J. Steele, M. Ford, Directional asymmetry in the human clavicle. *Int. J. Osteoarchaeol.* 9 (1999) 18-28.
18. B.M. Auerbach, M.H. Raxter, Patterns of clavicular bilateral asymmetry in relation to the humerus: variation among humans. *J. Hum. Evol.* 54 (2008) 663-674.
19. E.E.A. Fatah, N.R. Shirley, M.R. Mahfouz, B.M. Auerbach, A Three-dimensional analysis of bilateral directional asymmetry in the human clavicle. *Am. J. Phys. Anthropol.* 149 (2012) 547-559.
20. A. Mohsin, Z. Alam, Ekramuddin, N.A. Faruqi, Bilateral variations in the growth and development of human foetal clavicle. *Biomed. Res.* 24(2) (2013) 235-241.
21. B.P. Cunningham, A. McLaren, M. Richardson, R. McLemore, Clavicular length: The assumption of symmetry. *Orthopedics* 36(3) (2013) e343-e347.
22. M. Ledger, N. Leeks, T. Ackland, A. Wang, Short malunions of the clavicle: An anatomic and functional study. *J. Shoulder Elbow Surg.* 14(4) (2005) 349-354.
23. R. Lugo, P. Kung, B. Ma, Shoulder biomechanics. *Eur. J. Radiol.* 68 (2008) 16-24.

24. M. Iannolo, F.W. Werner, L.G. Sutton, S.M. Serell, S.M. VanValkenburg, Forces across the middle of the intact clavicle during shoulder motion. *J. Shoulder Elbow Surg.* 19 (2010) 1013-107.
25. B. Patel, P.A. Gustafson, J. Jastifer, The effect clavicle malunion on shoulder biomechanics; A computational study. *Clin. Biomech.* 27 (2012) 436-442.
26. R.J. Hillen, B.J. Burger, R.G. Pöll, C. Niek van Dijk, D.Veegeer, The effect of experimental shortening of the clavicle on shoulder kinematics. *Clin. Biomech.* 27 (2012) 777-781.
27. A. Bachoura, A.S. Deane, J.N. Wise, S. Kamineni, Clavicle morphometry revisited: a 3-dimensional study with relevance to operative fixation. *J. Shoulder Elbow Surg.* 22 (2013) e15-e21.
28. N. Matsumura, N. Nakamichi, H. Ikegami, T. Nagura, N. Imanishi, S. Aiso, Y. Toyama, The function of the clavicle on scapular motion: a cadaveric study. *J. Shoulder Elbow Surg.* 22 (2013) 333-339.
29. G. Olivier, Anthropologie de la clavicule. *Bull. Mém. Soc. Anthropol.* 10 (1951) 67-99, 121-157
30. H. Kaur, Harjeet, D. Sahni, I. Jit, Length And Curves of The Clavicle In Northwest Indians. *J. Anat. Soc. India* 51(2) (2002) 199-209.
31. Z.J. Daruwalla, P. Courtis, C. Fitzpatrick, D. Fitzpatrick, H. Mullett, Anatomic Variation of the Clavicle: A Novel Three Dimensional Study. *Clin. Anat.* 23 (2010) 199-209.
32. M.K. Haque, D.I. Mansur, K. Sharma, Study on Curvatures of Clavicle with its clinical Importance. *Kathmandu Univ. Med. J.* 36(4) (2011) 279-282.
33. A. Bernat, T. Huysmans, F. Van Glabbeek, J. Sijbers, J. Gielen, A. Van Tongel A, The Anatomy of the Clavicle: A Three-dimensional Cadaveric Study. *Clin Anat* (2013) DOI: 10.1002/ca.2228810.1002/ca.22288.
34. N.R. Shirley, Age and sex estimation from the human clavicle: an investigation of traditional and novel methods. PhD Thesis, 2009.
35. E. Ruiz Mediavilla, B. Perea, E. Labajo, J.A. Sánchez, A. Santiago, E. Dorado, Determining sex by bone volumen from 3D images: discriminating analysis of the tali and radii in a contemporary Spanish reference collection. *Int. J. Legal Med.* 126 (2012) 623-631.
36. B. Calais-Germain, Anatomía para el movimiento. Ed. Los libros de la liebre de marzo, 1995.
37. K.E. Stull, M.L. Tise, Z. Ali, D.R. Fowler, Accuracy and reliability of measurements obtained from computed tomography 3D volume rendered images. *Forensic Sci. Int.* 238

(2014) 133-140.

38. T. Adao Perini, G. Lameira de Oliveira, J. Dos Santos Ornellas, F. Palha de Oliveira, Technical error of measurement in anthropometry. *Rev. Bras. Med. Esporte* vol. 11 (1) Jan/Fev (2005) 86-90.

39. C.Y. Fung, *Biomechanics. Mechanical properties of living tissues*. Ed. Springer, 1997.

40. C.N. Shaw, Is “hand preference” coded in the hominin skeleton? An in-vivo study of bilateralmorphological variation. *J. Hum. Evol.* 61 (2011) 480-487.



### 5.3 ARTÍCULO 3

#### **SEX DETERMINATION FROM THE PATELLA:**

**A volumetric and metric study on 3D images  
in two contemporary Spanish reference collections**

*This chapter has been submitted to the Int J Legal Med*

#### **DETERMINACIÓN DE SEXO EN LA RÓTULA:**

**Un estudio volumétrico y métrico sobre imágenes 3D  
en dos colecciones de referencia Españolas contemporáneas**



## Resumen

La rótula es un hueso pequeño imbricado en el tendón cuádriceps. Su principal función es proteger a este tendón y mejorar el mecanismo extensor. El dimorfismo sexual de la rótula ha sido previamente estudiado en otras poblaciones pero no es un resto óseo comúnmente usado para determinar el sexo en restos esqueléticos. Debido a que no siempre es posible recuperar los huesos más informativos para determinar el sexo es necesario investigar sobre el poder discriminante de otros restos y otras variables para evaluar si pueden ser utilizadas en la determinación del sexo, siempre considerando el origen de la población. Con este objetivo en mente las rótulas de 134 individuos, 82 varones y 52 mujeres, procedentes de dos colecciones de referencia españolas contemporáneas fueron escaneadas en tres dimensiones; un total de 119 rótulas derechas y 104 izquierdas, 89 de las cuales forman pareja. El PICZA 3D láser escáner es el que ha sido utilizado para obtener las reproducciones 3D del hueso, lo cual permite calcular variables poco testadas, como el volumen, a parte de medir las variables métricas comúnmente estudiadas. En total se midieron 6 variables métricas y 5 volumétricas y se realizó un análisis discriminante utilizando el paquete estadístico PASW Statistics 18. El volumen total derecho y la anchura máxima derecha han sido las variables que han mostrado un mayor poder discriminante, clasificando correctamente el 82.4% de la muestra. La combinación de la anchura máxima derecha y la altura máxima derecha clasificó correctamente el 84% de la muestra. Los mejores resultados de clasificación se obtuvieron con la combinación de casi todas las variables, clasificando correctamente el 86.5% de la muestra. La prueba de validación realizada sobre una muestra de 20 rótulas confirma que la rótula es útil para determinar el sexo, clasificando correctamente el 93.3% de la muestra con la combinación de la altura máxima derecha y la anchura máxima derecha.

**Palabras clave:** Rótula, escaneo 3D, volumen, métrica, determinación de sexo, población española





## **Sex determination from the patella: A volumetric and metric study on 3D images in two contemporary Spanish reference collections**

### **Abstract**

The patella is a small bone embedded in the quadriceps tendon. Its main function is to protect this tendon and improve the extensor mechanism. The sexual dimorphism of the patella has been previously studied in several populations but it is not a skeletal remain commonly used to determine sex in skeletal remains. Because it is not always possible to recover the most informative bones to assign sex it is necessary to investigate about the discriminant power of other remains and other variables to evaluate if they can be used in sex determination, always considering the population origin. With this objective in mind the patellae of 134 individuals, 82 males and 52 females originate from two contemporary Spanish reference collections have been 3D scanned; a total of 119 right and 104 left patellae, 89 of which are paired. The PICZA 3D laser scanner has been the scanner used to 3D scan the sample obtaining 3D reproductions of the bone which allow calculate low tested variables, as volume, apart from measuring the common metric variables. In total 6 metric and 5 volumetric variables have been measured and a discriminant analysis has been performed using the PASW Statistics 18. The right total volume and the right maximum width have been the variables with a higher discriminant power, classifying correctly the 82.4% of the sample. The combination of the right maximum width and the right maximum height classify correctly the 84% of the sample. The best classifying results are obtained with the combination of all variables, correctly classifying the 86.5% of the sample. The validation test performed on a sample of 20 patellae confirms the patella is useful to determine sex classifying correctly the 93.3% of the sample with the combination of the right maximum height and the right maximum width.

**Keywords:** Patella, 3D scan, volume, metrics, sex determination, Spanish population

The patella is the greatest sesamoid bone of the human body and it is embedded in the femoral quadriceps muscle tendon. It has a triangular form and four parts can be distinguished anatomically [1]; (1) The basis patellae (the base of the patella) which is wide for the femoral quadriceps muscle insertion from above. (2) The apex patellae, which vertex points down, is the site of insertion for the rotulian tendon that connects the patella with tibia. (3) The facies articularis located in a posterior position articulating with the femur. It has medial and lateral facets which lean from an smooth elevated crest. The lateral facet is mayor

than the medial facet and it articulates with the mayor surface of the lateral femur condyle [2]. (4) The facies anterior which is non articular, rough and where the quadriceps femoris tendon attaches.

The patella begins as a cartilage model during the seventh to eighth week in utero. Between 18 months and 6 years its mineralization takes place from multiple ossification centers, not being often present until the age of 4 or 5 [3]. At the beginning of the ossification it has an oval disk form, it is not until the growth progresses when its form becomes more triangular, acquiring the adult morphology just prior to or during adolescence. The slight rise which separates the two posterior articular facets may not be distinct until late in childhood [3]. The patella articulation is the biggest and the most superficial. It articulates only with the distal end of the femur. It is a synovial articulation of hinge type, where movements are a combination of slidding, rolling and rotation over a vertical axis. It consists of 3 articulations: two femorotibial articulations (lateral and medial) between medial and lateral condyles of the femur and tibia, and a third femoropatellar articulation between the patella and the femur [4]. It is mechanically weak due to the inconsistency of its articular surfaces. Its stability firstly depends on the force and actions of the surrounded muscles and of its tendons and secondly depends on the ligaments that connect the femur and the tibia. The main stabilizer muscle in this articulation is the quadriceps femoris muscle [4].

One of the objectives in Forensic Anthropology is to determine the sex of the skeletal remains which are under study. It is not always possible to recover the most informative bones as pelvis or cranium so the study of the discriminant power of other bones and variables is necessary if the researcher ones to determine sex with reliability. The value of certain characteristics vary depending on the population group studied [5] so the importance of obtaining data from contemporary skeletal reference collections of different populations is high. The patella seems to be a forgotten bone in forensic anthropology despite sexual differences are expected to be found because of its role in the knee joint, considering the high dimorphism of the femur and tibia [6].

The sexual dimorphism of the patella has been previously studied in populations of different origin and periods. One of the first works about patella was the one performed by Vriese (1913) who showed an early interest about the morphology of the patella and did a comparative study among different group populations [7]. Gunn and McWilliams (1978)

were one of the firsts who studied the sexual dimorphism of the patella on a Todd Collection sample using volumetric analysis and obtaining a high average accuracy of classification for Europeans (88%) [8]. Introna et al. (1998) studied a sample composed of 80 skeletons (40 males and 40 females) from southern Italian population. A total of seven variables were measured being the thickness and the height of facies articularis the variables with the highest percentage of correct classification (78.8%). The combination of variables which obtained the highest accuracy of classification (83.8%) was the maximum width and thickness [9]. AboSamak et al. (1999) studied an Egyptian sample of 62 individuals (34 males and 28 females). Seven variables were measured and the medial articular facet height was the only variable which did not show differences by sex. The maximum width was the most dimorphic variable obtaining a 93.55% of accuracy, followed by the width of the lateral articular surface and then the maximum height. The best combination of variables to classify the sample was the maximum thickness and the width of lateral articular surface obtaining a 95% of accuracy [10]. Trinkaus (2000) studied the articular proportions of the patella over recent and Pleistocene samples finding that Archaic humans show more symmetry of the medial and lateral facets than recent human samples. Pleistocene archaic Homo patellae seem to be morphologically indistinguishable from those of modern humans. Neandertals show a relatively elevated thickness of the patella which has been shown to be a biomechanical consequence of the high body mass to limb segment lengths proportions [11]. Kemkes-Grottenthaler (2005) studied a sample of 52 right patellae (26 males and 26 females) from a prehistoric skeletal sample from Germany obtaining a sexing accuracy around 84%. The medial and lateral facies demonstrate great interpersonal variation in size [12]. Bidmos et al. (2005) studied a sample of 120 left patellae (60 males and 60 females) of South African whites from the Raymond A. Dart Collection, measuring six variables and being the maximum height the variable with the highest accuracy of classification (85%) [13]. Dayal et al. Bidmos (2005) studied a sample of 120 patellae (60 males and 60 females) originate from the Raymond A. Dart Collection of Human Skeletons representing a South African of African descent population group and achieving an accuracy rate classification of 85%. The females were better correctly classified than males and the two most discriminant variables were maximum width and maximum height [14]. Mahfouz et al. (2007) proposed a new sex classification method from patellae using a novel automated feature extraction technique. A sample of 228 patellae (95 females and 133 males) were CT scanned and a set of statistical and supervised neural network classification methods were used to classify the patellar feature vectors according to sex. A new method for sex determination was proposed which

extracts more categories of features other than the geodesic measurements and analyzes the classification problem in a nonlinear approach using neural networks. Considering geometric features, moments and principal axes achieved an accuracy of 93.51% [15]. Sakaue (2008) calculated sex discriminant functions in recent Japanese skeletons and developed a new method for age estimation analyzing the patellae of 183 males and 100 females. Six variables were measured; maximum height, maximum width, maximum thickness, articular height, width of the medial facet and width of the lateral facet. Considering all the variables the discriminant function classified correctly the 85% of the sample [16]. Akhlaghi et al. (2010) studied a sample of 113 patellae (57 males and 56 females) originate from fresh cadavers of Iranian population and measuring three measurements; maximum height, maximum width and maximum thickness. The higher accuracy was obtained with the maximum width (91.2%). When all three variables were considered the accuracy achieved was 92.9%. The particularity of this study is that the sample was separated in age groups observing that the average accuracy of sex determination by using the maximum thickness increased with age. This not occurred with the other dimensions may be due to role of other variables such as ethnic and geographical factors [17]. Phoophalee et al. (2012) studied the northern Thais from Chian Mai, a sample of 191 pairs of normal patellae (137 males and 54 females) with and interval of age of 15-96 years. Seven variables were measured including the volume. The left maximum width of lateral articular facet yielded the highest value of correct sex determination with an average accuracy of 85.3% (82.5% in males and 92.6% in females). All six parameters of the left patella achieved a 90.5% (89% in males and 94.4% in females). The volumetric method consisted in submerging each sample into a container of water and the displacement method was used to calculate the volume of the bone. The volume had an average accuracy of 80.6% considering the right volume [18]. Afrianty et al. (2013) compared the accuracy of the results obtained from the Back Propagation Neural Network models of Artificial Neural Network methods by using data and discriminant function analysis result of pelvic bones and patella from previous work. The sample included 136 pelvic bones and 133 patellae. For patella bones the average accuracy for males and females was 94.09%. Previous studies using Discriminant Function Analysis obtained an accuracy of 92.9%. The conclusion of the study was that in gender determination Back Propagation Neural Network gives high accuracy of classification for both bones compared with Discriminant Function Analysis [19]. Kayalvizhi et al. (2015) studied the North Bengal population from North Indian including 31 skeletons (19 males and 12 females). Seven variables were measured being the most dimorphic variables the maximum height, the height

of the lateral facet, the maximum width and the height of the medial facet, all of them of the right patella. On the left side the most dimorphic variables were the maximum height and the maximum width and then the height of the lateral facet. The highest accuracy of classification was 80.6% [20]. Peckmann et al. (2016) recently published a study on Spanish population, studying a sample of 106 individuals (55 males and 51 females) from the Granada Osteological Collection. The best classifying results were obtained with the combination of the maximum width, the width of the lateral facet and the width of the medial facet achieving an accuracy of 84.8% [21].

Several studies about the patella have been performed in relation with medical pathologies and treatments. Heegaard et al. (1995) studied the biomechanics of the human patella during passive knee flexion to help facing the problem of evaluating surgical procedures [22]. Miller et al. (1996) studied the patellar height on sagittal MR imaging on the knee to determine if the radiographic assessment of patella alta using the patellar tendon:patella ratio can be applied to sagittal MR images of the knee, finding this was possible [23]. Faber et al. (2001) thought patella's cartilage morphology presented sex specific changes related to age and this could indicate a sex specific susceptibility to degenerative joint. The cartilage thickness, volume and articular surface areas of the knee joint were compared between young healthy, non-athletic female and male individuals. Significant gender differences in cartilage volume and surface area of males and females were found which should be taken into account when retrospectively estimating articular cartilage loss in patients with symptoms of degenerative joint disease [24]. Biedert et al. (2006) described another method of measuring patellar height on MRI using the true articular cartilage patellotrochlear relationship which could be helpful to define an underlying pathology of patellar height, such as patella alta or infera [25]. Fucentese et al. (2006) evaluated the patellar morphology in normal and trochlear dysplastic knees to know their differences [26]. Iranpour et al. (2008) studied the relationship between the patellar thickness and various patellar dimensions on three-dimensional reconstructed computed tomographic scans from 37 normal adult knees. The objective of the study was to establish the appropriate size of the patellar implant-bone composite to ensure functional success in arthroplasty. The width of the patella was a reliable indicator for predicting normal patellar thickness establishing that the thickness of the patella was  $\frac{1}{2}$  of the maximum width [27]. Phillips et al. (2010) did a review of the methods of imaging for measuring the patellar height, dividing the techniques into two groups: a direct method that relate the position of the patella to the femur and an indirect method which relates the position to the tibia [28].

Olateju et al. (2013) focused on the importance of morphometric analyses in human identification, knee implant design and certain surgical procedures of the knee. A sample of 46 South African cadavers (25 females and 21 males) of European ancestry was studied and seven variables were measured; maximum height, maximum width, maximum thickness, width of the medial articular facet, width of the lateral articular facet, patellar ligament height and patellar ligament width. No side differences were found except from thickness and patellar ligament widths. When the thickness and the width of the patellae were compared the correlation in the right knee was stronger than that in the left knee [29].

The objective of the present study is to determine the discriminant power of the variable volume on the patella because it is a low tested variable that has offered good results in other bones [30,31]. Because the metric variables are the commonly measurements used to determine sex, the second objective of this study is to offer formulae to determine sex from the patella in the Spanish population.

### Sample

The study sample originates from two contemporary Spanish reference collections from the twentieth century located in the Legal Medicine School of Madrid; EML1 and EML 2. EML 1 is made up of 131 individuals, 67 males and 64 females, whose date of birth ranges from 1881 and 1973 and whose date of death ranges from 1975 and 1985. EML 2 is made up of 88 individuals, 63 males and 25 females, whose date of birth ranges from 1941 and 1976 and whose date of death is 1996. The patellae selected were those found in a good state of preservation and with none pathology or taphonomic alterations. A total of 223 patellae have been 3D scanned, belonging to 134 individuals (82 males and 52 females); 119 right (77 males and 42 females) and 104 left (64 males and 40 females), 89 of which are paired. The distribution of the sample by sex and side is shown in Table 1. For the validation study a sample of 20 patellae (10 males and 10 females) originates from the same two reference collections was 3D scanned to perform the analysis.

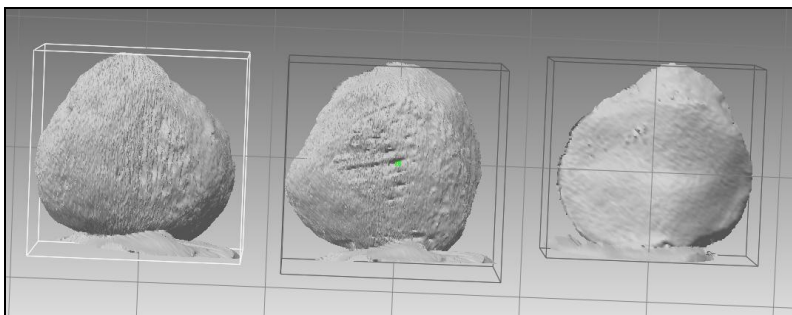
**Table 1.** Distribution of patella sample

	Male	Female
<b>Paired R-L</b>	59	30
<b>Unpaired R</b>	18	12
<b>Unpaired L</b>	5	10
<b>Total</b>	82	52

## Methodology

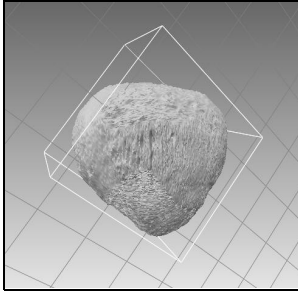
The 3D scanner used to 3D scan the sample was the Picza 3D Laser Scanner LPX-250, made by Roland. This scanner measures 528×431×742 mm and is a non contact and a dual-mode scanner; it makes rotator or plane scanning thanks to its rotating platform while a 600-700 nm wave laser is projected from the right. This laser reads the surface of the item from the bottom to the top, scanning with a distance between points which range from 0.2 to 1 mm. The optimal distance selected for the patella was 0.4 mm considering the parameters of quality and time. The methodology applied is similar to that one described on previous studies based on the talus, radius and clavicle originate from the same collections [30,31]. To 3D scan the patellae two rotatory scans and one plane scan of the posterior part have been performed. The first rotatory scan has been made positioning the patella on its anatomical position with the apex resting on the platform. The second rotatory scan was made positioning the patella resting on its medial edge. The last plane scanning was made to finish off the posterior part of the patella. The time needed for the rotator scans was about 10 minutes and for the plane scan about 5 minutes. The different orientations were displayed in the program associated with the scanner; Dr. Picza3, visualizing a point cloud. To merge the different orientations of the patella the Pixform software has been used (**Fig. 1**). To merge two orientations is necessary to mark three points in common on each scan. The program returns a result of the merge being the excellent result the only one accepted (**Fig. 2**). To obtain the final image the Geomagic program is used to clean, refill and smooth the 3D reproductions. This program also serves to calculate all the metric and volumetric variables.

**Fig. 1** Rotating and slice scans of the patella





**Fig. 2** Assembled scans of the patella



Once the images were processed a total of 6 metric and 5 volumetric variables were measured on each image and a database was created using the statistical program PASW Statistics 18. The metric measurements selected were the commonly used in anthropometric studies and the ones selected for the majority of scientists who have previously studied the sexual dimorphism of the patella [8-19]. The metric variables measured on the patella are described in Table 2.

**Table 2.** Description of linear measurements

<b>Maximum Height</b>	The greatest linear distance between the basis patellae and the apex
<b>Maximum width</b>	The greatest linear distance between the medial and lateral edges
<b>Maximum thickness</b>	The greatest linear distance between the anterior surface and the median ridge on the posterior surface
<b>Width of medial articular facet</b>	Maximum width from the medial edge of the patella to the median ridge of the articular facet
<b>Width of lateral articular facet</b>	Maximum width from the lateral edge of the patella to the median ridge of the articular facet
<b>Maximum height of lateral articular facet</b>	Maximum height of the lateral articular facet on the posterior aspect of the patella

Besides these variables another one was selected to study its discriminant power. The volume has been a low studied variable because it is not easy to calculate with reliability. This problem is solved with the 3D scanning which allows to calculate the volume in an easy and reliable manner. Because it is not always possible to recover the bone in a good state of preservation and there are areas of the bone which are more discriminant than others the volume of different parts have been calculated apart from the total volume; the medial volume, the lateral volume, the superior volume and the inferior volume. To calculate the partial volumes the “compute volume to plane” tool was selected and the “line” option was chosen to align the plane, then the volume of each of the plane’s divisions is obtained. To calculate medial and lateral volumes the bone was positioned in an anterior view and a line

was traced to divide the image. The two points that mark the division are the same which establish the maximum height of the patella. The same procedure has been followed to calculate the superior and inferior volumes but in that case the points that mark the division are the ones which establish the maximum width of the patella.

All the metric and volumetric variables were measured twice with an interval of time of two months between measures. The statistical analysis was performed using the PASW Statistics 18. A paired t-test was performed to verify there were no statistically significant differences between measures. A second observer measured six variables on the 3D reproduction of 20 patellae; maximum length, maximum width, medial volume, distal volume, superior volume and inferior volume, and a paired t-test was performed to verify there were no statistical significant differences between observers. To verify there were no statistically significant differences between the measures taken on the 3D reproduction and the measures taken directly on the dry bone the maximum height and the maximum width were measured twice on the entire sample using a sliding-caliper, with an interval of time of two months. A paired t-test was performed to verify there were no differences between these two measures taken directly on the bone and a second paired t-test was performed to verify there were no statistically significant difference between the measures taken on the 3D image and the measures taken directly on the dry bone.

A descriptive analysis of the sample was performed to ascertain the mean values of each variable studied, separating the sample by sex and side. To study the distribution of the sample and reject the hypothesis that the sample did not follow a normal distribution a kolmogorov-Smirnov test was performed. Because the sample originates from two skeletal reference collections, before treating it as a whole, an unpaired t-test was performed to check there were not statistically significant differences between the two collections. A paired t-test was performed to verify whether there were statistically significant differences by side. An unpaired t-test was performed to prove there were statistically significant differences by sex and confirm it was useful to continue with the discriminant analysis. The discriminant analysis consists of calculating discriminant functions which permit to determine the sex replacing the values of the variables on the formula. These functions are calculated using Fisher's coefficients, classifying each case on the group where it has the highest discriminant punctuation. Also a classification tree was performed to calculate the sectioning points to discriminate sex and to know the intervals where sex determination could be more

controversial because of the overlapping zone where both sexes are represented. Data are separated in intervals on the basis of the best predictor of the dependent variable, in this case sex. A validation test was performed on a sample of 20 patellae to ascertain the rate of accurate classification. Finally to confirm the importance of having formulae and intervals specific of populations a comparative study was performed using the data and the formulae that best classified the samples of other population [9,10,12-14,16-21] over the Spanish sample.

## Results

The kolmogorov-Smirnov test results ( $p>0.05$ ) caused the rejection of the hypothesis that the sample did not follow a normal distribution so parametric tests were then performed. The paired t-tests results ( $p>0.05$ ) show there are no statistically significant differences between the two measures taken directly on the dry bone and the two measures taken on the 3D image so a mean of the two measurements was calculated to minimize errors. No statistically significant differences ( $p>0.05$ ) were found between the direct measurements taken on the dry bone and the measurements taken on the 3D reproduction so the study continued considering the measures obtained from the 3D images. No statistically significant differences ( $p>0.05$ ) were found between the measurements taken by a second observer (Table 3) confirming the reliability of the measures.

**Table 3.** Results of the paired t-test (inter-observers)

	Maximum height	Maximum width	Medial volume	Lateral volume	Superior volume	Inferior volume
Mean	-0.065	0.005	0.217	-0.215	0.256	-0.25
t	-0.831	0.063	1.166	-1.146	1.321	-1.3
p	0.416	0.951	0.257	0.265	0.201	0.208

There were no statistically significant differences between collections so the sample was unified and treated as a whole. The results of the descriptive analysis are provided in Table 4 including the results of the paired t-test performed to verify whether there are statistically significant differences by side. The variables which showed statistically significant differences by side were the width of the lateral facet and the medial volume in males and the lateral volume in males and females, being the right values greater for the medial volume and being the left values greater for the width of the lateral facet and the lateral volume.

The unpaired t-test shows there are statistically significant differences by sex so discriminant functions (Table 5) and classification trees (Table 6) were performed. The classification functions show the percentage of accurate classification using each of the variables. The variable which shows a greater sexual dimorphism is the right total volume and the right maximum width correctly classifying the 82.4% of the sample. The right medial volume and the right inferior volume classify correctly the 80.7% of the sample, being the left maximum height the second metric measurement which better classify the sample (78.8%). The best discriminant function is the one which combine all the variables classifying correctly the 86.5% of the sample  $[-0.626(7R) + 0.296(9R) - 0.625(10R) + 0.75(1R) + 0.557(2R) - 0.615(3R) - 0.261(4R) - 0.157(5R) - 0.197(6R) - 1.153(7L) - 0.056(8L) + 0.619(10I) - 0.761(1L) - 0.435(2L) + 0.742(3L) + 0.692(4L) + 0.79(5L) + 0.771(6L) - 41.756]$ , followed by the one which combine the maximum height and the maximum width, classifying correctly the 84% of the sample. The variable which classifies worst the sample is the maximum thickness.

**Table 4.** Descriptive analysis (mm. and cm<sup>3</sup>)

	Male					Female			
	Side	N	Mean	SD	p <sup>a</sup>	N	Mean	SD	p <sup>a</sup>
<b>Maximum height</b>	R	77	42.257	3.222	0.192	42	37.54	2.576	0.116
	L	64	41.906	3.434		40	37.925	2.593	
<b>Maximum breath</b>	R	77	43.867	3.189	0.932	42	39.142	3.068	0.588
	L	64	43.703	3.499		40	39.466	3.281	
<b>Maximum thickness</b>	R	77	20.412	2.005	0.524	42	18.287	1.993	0.215
	L	64	20.2	2.124		40	18.576	2.04	
<b>Width of the medial facet</b>	R	77	19.939	2.251	0.492	42	17.583	2.148	0.242
	L	64	19.746	2.22		40	17.212	2.209	
<b>Width of the lateral facet</b>	R	77	26.05	2.275	0.022*	42	23.337	2.516	85
	L	64	26.547	2.081		40	23.94	2.347	
<b>Lateral articular height</b>	R	77	30.477	2.706	0.526	42	27.768	2.061	0.68
	L	64	30.52	2.493		40	27.649	2.249	
<b>Total volume</b>	R	77	15.818	3.167	0.649	42	11.438	2.348	0.083
	L	64	15.804	3.67		40	11.858	2.487	

<b>Medial volume</b>	R	77	8.447	1.816	0.018*	42	6.201	1.425	0.138
	L	64	8.223	2.003		40	6.222	1.424	
<b>Lateral volume</b>	R	77	7.371	1.588	0.004**	42	5.236	1.109	0.006**
	L	64	7.578	1.843		40	5.637	1.218	
<b>Superior volume</b>	R	77	7.293	1.658	0.073	42	5.367	1.314	0.053
	L	64	7.414	1.764		40	5.717	1.242	
<b>Inferior volume</b>	R	77	8.52	1.863	0.197	42	6.071	1.303	0.627
	L	64	8.39	2.167		40	6.139	1.629	

<sup>a</sup>level of significance paired t-test side-based differences \*p<0.05 \*\*p<0.01

**Table 5.** Discriminant analysis. Classification functions.

	Side	Coefficient	Constant	Wilk's $\lambda$	%CC	%M	%F
<b>Maximum height (1)</b>	R	0.52	-20.755	0.637	78.2	79.2	76.2
	L	0.404	-16.126	0.72	78.8	75	85
<b>Maximum width (2)</b>	R	0.477	-19.802	0.656	82.4	80.5	85.7
	L	0.363	-15.093	0.729	76	76.6	75
<b>Maximum thickness (3)</b>	R	0.531	-10.267	0.793	71.4	70.1	73.8
	L	0.371	-7.191	0.873	65.4	65.6	65
<b>Width of the medial facet (4)</b>	R	0.477	-8.971	0.799	71.4	71.4	71.4
	L	0.523	-9.707	0.768	74	73.4	75
<b>Width of the lateral facet (5)</b>	R	0.529	-13.058	0.75	73.9	70.1	81
	L	0.537	-13.613	0.765	70.2	68.8	72.5
<b>Lateral articular height (6)</b>	R	0.448	-13.033	0.776	76.5	76.6	76.6
	L	0.442	-12.919	0.788	74	71.9	77.5
<b>Maximum height</b>	R	0.28	-21.059	0.647	84	81.8	88.1
<b>Maximum breath</b>	R	0.238					

<b>Total volumen (7)</b>	R	0.519	-7.066	0.655	82.4	77.9	90.5
	L	0.369	-5.109	0.74	75	68.8	85
<b>Medial volumen (8)</b>	R	0.787	-5.765	0.709	80.7	77.9	85.7
	L	0.615	-4.443	0.771	75	70.3	82.5
<b>Lateral volumen (9)</b>	R	1.032	-6.505	0.662	77.3	72.7	85.7
	L	0.728	-4.81	0.746	77.9	73.4	85
<b>Superior volumen (10)</b>	R	0.806	-5.104	0.735	74.8	72.7	78.6
	L	0.676	-4.435	0.783	74	68.8	82.5
<b>Inferior volumen (11)</b>	R	0.86	-6.272	0.672	80.7	76.6	88.1
	L	0.575	-4.178	0.762	73.1	68.8	80

The results obtained on the classification tree slightly differ from the results obtained on the discriminant functions offering the intervals where sex determination would be more uncertain.

**Table 6.** Discriminant analysis. Classification intervals (mm. and cm<sup>3</sup>)

	Side	Classification interval	%M <sup>1</sup>	%F <sup>2</sup>	%CC <sup>3</sup>	%M	%F
<b>Maximum height</b>	R	≤ 38.46	22.9	77.1			
		(38.46, 41.937]	61.1	38.9	80.7	89.6	64.3
		>41.937	97.9	2.1			
	L	≤ 39.972	32.7	67.3	78.8	73.4	87.5
		>39.972	90.4	9.6			
<b>Maximum width</b>	R	≤ 41.115	25.5	74.5			
		(41.115, 41.906]	66.7	33.3	84	84.4	83.3
		>41.906	95	5.0			
	L	≤ 42.176	32.7	67.3	78.8	73.4	87.5
		>42.176	90.4	9.6			
<b>Maximum thickness</b>	R	≤ 18.959	38.3	61.7			
		(18.959, 20.595]	72.2	27.8	73.9	76.6	69
		>20.595	91.7	8.3			

	L	$\leq 13.084$	35.5	64.5	70.2	82.8	50
		$>13.084$	72.6	27.4			
<b>Width of the medial facet</b>	R	$\leq 20.029$	47.9	52.1	67.2	55.8	88.1
		$>20.029$	89.6	10.4			
	L	$\leq 18.336$	29.3	70.7	77.9	81.3	72.5
		$>18.336$	82.5	17.5			
<b>Width of the lateral facet</b>	R	$\leq 24.719$	40.7	59.3			
		(24.719, 26.406]	75	25	73.9	68.8	83.3
		$>26.406$	97.2	2.8			
	L	$\leq 26.355$	40.3	59.7	73.1	60.9	92.5
		$>26.355$	92.9	7.1			
<b>Lateral articular height</b>	R	$\leq 28.846$	34	66			
		(28.846, 29.989]	66.7	33.3	77.3	79.2	73.8
		$>29.989$	93.8	6.2			
	L	$\leq 27.942$	29	71			
		(27.942, 30.233]	58.1	41.9	74	85.9	55
		$>30.233$	88.1	11.9			
<b>Total volume</b>	R	$\leq 13.802$	33.9	66.1			
		(13.802, 15.241]	83.3	16.7	80.7	74	92.9
		$>15.241$	97.9	2.1			
	L	$\leq 13.56$	34.6	65.4			
		(13.56, 16.363]	76.2	23.8	76.9	71.9	85
		$>16.363$	96.8	3.2			
<b>Medial volume</b>	R	$\leq 6.808$	27.7	72.3			
		(6.808, 8.53]	80.6	19.4	82.4	83.1	81
		$>8.53$	97.2	2.8			

	L	$\leq 7.195$	36.5	63.5	75	70.3	82.5
		$>7.195$	86.5	13.5			
<b>Lateral volume</b>	R	$\leq 5.56$	28.6	71.4			
		(5.56, 6.921]	55.6	44.4	77.3	87	59.5
		$>6.921$	97.9	2.1			
	L	$\leq 6.624$	34.6	65.4			
		(6.624, 7.181]	70	30	76.9	71.9	85
		$>7.181$	92.9	7.1			
<b>Superior volume</b>	R	$\leq 4.748$	17.4	82.6			
		(4.748, 6.823]	58.3	41.7	77.3	94.8	45.2
		$>6.823$	93.8	6.2			
	L	$\leq 6.543$	38.5	61.5			
		(6.543, 7.619]	71.4	28.6	73.1	68.8	80
		$>7.6195$	93.5	6.5			
<b>Inferior volume</b>	R	$\leq 7.476$	35.6	64.4	79	72.7	90.5
		$>7.476$	93.3	6.7			
	L	$\leq 8.085$	41.9	90.5	71.2	59.4	90
		$>8.085$	90.5	9.5			

<sup>1</sup>Percentage of males on each interval <sup>2</sup>Percentage of females on each interval <sup>3</sup>Percentage of correct classified

The results of the validation test performed on a sample of 20 patellae (10 males and females) are shown in Table 7. The variables which best classified the sample were the total volume, the superior volume and the maximum width and the best result was obtained with the combination of the maximum height and the maximum width classifying correctly the 93.3% of the sample. The worst discriminant variable was the maximum thickness.



**Table 7.** Validation test

	Maximum height	Maximum width	Maximum thickness	Width medial facet	Width lateral facet	Height articular facet
<i>CC<sup>t</sup></i>	80%	86.67%	66%	80%	73.3%	80%
	Total volume	Medial volume	Lateral volume	Superior volume	Inferior volume	Maximum height & maximum width
<i>CC<sup>t</sup></i>	86.67%	80%	80%	86.67%	80%	93.3%

CC percentage of correctly classified

The mean values of the variables of other populations and the correct classification percentages, when they were present, are shown in Table 8 and Table 9. The application of the formulae and data of other population over the study sample used for the validation test shows that the formulae for South African blacks, Egyptian, Medieval German and another Spanish population classified correctly the 86.7% of the sample. The formulae for Southern Italian, Iranian and South African whites classified correctly the 80% of the sample. The formulae applied on the sample were the ones with the highest percentages of accuracy.

**Table 8.** Comparison of patellar measurements from different populations (mm.)

Study	Present study Spanish		Peckmann Spanish		Introna South Italian		Kemkes-Grottenthaler Medieval German		Bidmos South African whites		Dayal South African blacks	
	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
(1)	<b>42.26</b>	37.54	<b>42.9</b>	37.89	<b>41.2</b>	37	<b>43.8</b>	39.5	<b>43.62</b>	38.4	<b>41.22</b>	36.48
(2)	<b>43.87</b>	39.14	<b>44.62</b>	40.30	<b>43.2</b>	39.4	<b>45.9</b>	39.8	<b>45.3</b>	43.3	<b>43.34</b>	38.97
(3)	<b>20.41</b>	18.29	<b>20.34</b>	18.13	<b>20.4</b>	18.3	<b>20.5</b>	18.2	<b>20.38</b>	18.3	<b>20.56</b>	18.2
(4)	<b>19.94</b>	17.58	<b>19.19</b>	17.02	<b>16.2</b>	14.6	<b>21.6</b>	18.6	<b>20.53</b>	18.21	<b>18.38</b>	16.34
(5)	<b>26.05</b>	23.34	<b>24.83</b>	22.47	<b>22.4</b>	20.5	<b>27.6</b>	24.8	<b>28.08</b>	24.95	<b>25.31</b>	22.91
(6)	<b>30.48</b>	27.77	<b>25.73</b>	23.62	<b>27.2</b>	24.3	<b>31</b>	28.2	<b>30.77</b>	27.58	<b>29.56</b>	27.86
CC(1)	78.2		75.5		71.25		80.8		85		79.2	
CC(2)	82.4				72.5		76.9		79.2		80	
CC(3)	71.4				78.75		76.9		75.8		77.5	
CC(4)	71.4				62.5		73.1		71.7			
CC(5)	73.9				63.75		71.2		67.5			
CC(6)	76.5				78.75		76.9		72.5			
CC(total)	84		84.8		83.8		84.6		85		83.5-85	

CC percentage of correctly classified CC(total) percentage of correctly classified combining variables

**Table 9.** Comparison of patellar measurements from different populations (mm.)

Study	Present study Spanish		Phoophalee Thai		Sakaue Japanese		AboSamak Egyptian		Kayalvizhi North Indian		Akhlaghi Iranian	
	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
(1)	<b>42.26</b>	37.54	<b>42.1</b>	37.5	<b>41.1</b>	36.6	<b>42.3</b>	38.6	<b>42.9</b>	38.1	<b>44.7</b>	38.3 7
(2)	<b>43.87</b>	39.14	<b>44.6</b>	39.6	<b>43.5</b>	39.1	<b>45</b>	39.3	<b>42.1</b>	39	<b>45.5</b>	40.1
(3)	<b>20.41</b>	18.29	<b>20.9</b>	18.6	<b>19.4</b>	17.7	<b>21.6</b>	18.9	<b>19.7</b>	18.6	<b>21.9</b>	20.3
(4)	<b>19.94</b>	17.58	<b>20.6</b>	18.2	<b>21.5</b>	19.3	<b>20.5</b>	18.4	<b>22.1</b>	19.8		
(5)	<b>26.05</b>	23.34	<b>26.6</b>	23.6	<b>27.5</b>	24.5	<b>25.8</b>	22	<b>25.3</b>	23.4		
(6)	<b>30.48</b>	27.77	<b>30.6</b>	28.2	<b>30.9</b>	28.3	<b>29</b>	26.4	<b>30.5</b>	26.7		
CC(1)	78.2		82.7				72.58				89.4	
CC(2)	82.4		82.7				93.55				91.2	
CC(3)	71.4		77				87.10				74.3	
CC(4)	71.4		69.6				66.13					
CC(5)	73.9		80.1				87.10					
CC(6)	76.5		69.1				79.03					
CC(total)	84		90.5		85		95.2		80.6		92.9	

CC percentage of correctly classified, CC(total) percentage of correctly classified combining variables

## Discussion

The patella seems to be the most omitted bone in Forensic Anthropology despite the fact that some sexual differences are expected as it plays a significant role in the knee joint and twice the femur and tibia are highly dimorphic [6]. The patella is a solid element of the human skeleton with no distinctive morphological characters or differences to determine sex or attribute race [9, 19]. It forms within the tendon of the quadriceps muscle, being very resistant to postmortem changes [9, 19] and could being available for personal identification purposes even in adverse condition [20]. It is a sesamoid bone which has a great survival in the archaeological context [12], being recovered intact due to its compact nature [14]. It is often availed intact even after major accidental deaths where long bones easily get fragmented [20]. Its study becomes very interesting and useful because it is not always possible to recover the most informative bones in a good state of preservation so it is important to investigate about the discriminant power of that bones which have a higher

probability of being found in a good state of preservation.

As regards sexual dimorphism males have a comparatively larger muscle build in comparison with females so it could be inferred that the patella might show a remarkable degree of sexual dimorphism [20]. The differences found in shape and size of the patella could be influenced and altered for the strength of the muscle mass [14]. The descriptive study reveals that males have greater values for all the variables indicating that patella shows sexual dimorphism being the next step to quantify the degree of dimorphism. The variables which better classify the sample are the right total volume and the right maximum width classifying correctly the 82.4% of the sample. The best results are obtained with the combination of all variables excluding the right medial volume and the left lateral volume, correctly classifying the 86.5% of the sample. The combination of the right maximum height and the right maximum width achieve a percentage of correctly classified of 84%. The different populations studies have in common that the discriminant function equations obtained from combination of variables are more useful than individual variables. The most dimorphic individual variable varies depending on the population but the most common have been the maximum height or the maximum width.

According to Trinkaus (2000) the significance of variation in the relative sizes of the medial and lateral patellar facets remains unclear. With rare exceptions, the lateral facet is larger than the medial one. Archaic human patellae have proportionately large medial or small lateral articular facets but in general lateral facet forces are greater than medial facet ones [12]. There has been described several types of medial and lateral facets depending on morphology and size [33]. The present sample and the other populations studied also show greater values for the width of the lateral facet in comparison with the width of the medial facet. These differences could be explained by the mediolateral distribution of joint reaction force that can be dependent upon the degree of knee flexion. The force distribution is influenced by the degree of genu valgum and anthropologically by the bicondylar angle [12]. Also the predominant use of one limb could produce better muscle tone on one side, which could possibly have a direct effect on the shape of the patella within its tendon. Posture and physique could also be contributing factors. The population with the greatest size difference in the width of the lateral and medial facet is the South African white population and the population with the closest values is the North Indian population, showing variability on this character.

Differences by side on the patella have not been described in previous studies [13,16,12,21,29]. The present study shows that only the width of the lateral facet and the medial volume in males and the lateral volume in males and females have statistically significant differences by side.

In comparison with other populations the differences on the values vary depending on the population compared. Compared with the Thai population [18], Spanish population shows quite similar values for all the variables being the maximum width and the measures related to the articular facets a little bit greater in the Thai population. This is the only study which shows values for the volume being the Spanish patellae volume slightly greater. The left maximum width of the lateral articular facet is the variable which best classify the Thai sample. In general seems that the Thai population has a higher sexual dimorphism because with all the variables the accuracy of classification achieved the 90.5%, better classifying the females. This sexual dimorphism difference is visible checking the volume values. The mean volume in males of both populations is similar ( $15.8 \text{ cm}^3$  in Spanish population and  $15.38 \text{ cm}^3$  in Thai population but lesser in Thai females population ( $11.6 \text{ cm}^3$  in Spanish population and  $10.79 \text{ cm}^3$  in Thai population)). Compared with the Japanese population [16] the mean values are higher in Spanish population except for the variables related to the articular facets. The combination of all variables achieved a classification accuracy of 85%, being the sexual dimorphism of this population similar to the Spanish population. Compared with the South African Black population [14] the Spanish patellae show greater mean values for all the variables, except for the thickness, classifying correctly the 85% of the sample with the maximum height, width and thickness. Compared with the South African White population [13] the Spanish patellae show lesser mean values for all the variables, except for the thickness, being the maximum height the greatest dimorphic variable. Compared with the North Indian population [20] the variable values are greater in the Spanish population, except for the maximum height and the width of the lateral facet, classifying correctly the 80.6% of the sample with the patella. Compared with the Egyptian population [10] this population shows higher mean values for maximum width, thickness and the width of the medial facet, but the measurements related to the lateral articular facet are higher in the Spanish sample. This population seems highly dimorphic because the maximum thickness has an accuracy of 93.55% and the combination of the maximum width and the width of the lateral articular facet achieve a 95.2% of correct classification obtaining the best classification rate with the patella. Compared with the Iranian population [17] this population shows higher values for

the three variables studied; maximum height, maximum width and maximum thickness. The best classification variable is the maximum width, as occurs in the present sample study, with an accuracy of 91.2%. The patella shows a high discriminant power in the Iranian population correctly classifying the 92.9% of the sample combining all the variables. Compared with the Southern Italian population [9] its mean values are lesser than the Spanish values. The variables with the highest discriminant power are the height of facies articularis and the maximum thickness (78.8%). The combination of the maximum width and the maximum thickness achieve an accuracy of classification of 83.8%. Compared with the German Medieval sample [12] this population shows greater values for all the variables, being the maximum height the variable which better classify the sample (80.8%), achieving the 84.6% of accuracy with the combination of all variables. Compared with the only Spanish population available [21] this population shows greater values for the maximum height and the maximum width, similar values for the thickness, and lesser values for the variables of the articular facet. In that case the best results are obtained with the maximum height (75.5%) in contrast with the best discriminant variable of the present study which is the maximum width (84.2%). The combination of variables reaches the 84% of correct classification in both cases. The population which shows the greatest values for the maximum height and the maximum thickness is the Iranian population and the German medieval population is the one which shows the greatest values for the rest of the variables. The Japanese population shows the lowest values for the maximum height and the maximum thickness. The North Indian population shows the lowest values for the maximum width and the South Italian population shows the lowest values for the width of the medial facet and for the width of the lateral facet. Surprisingly the lowest value of the height of the articular facet is shown by the Spanish population studied by Peckmann et al. (2016) while in the present sample study the value for this variable is quite high. This confirms the variability on the facets and the need to enlarge the sample study of populations.

When measuring the articular facets it is important to observe if there is bone formation on the margins which could produce an increase of patella dimensions and misclassify females, which suffer this process more commonly, in advanced ages. There can be changes in trabecular bone, product of plasticity process depending on age [12]. Keaveny et al. studied the age-related changes in trabecular bone mass or architecture and the differences between sexes. The 83-92% of the variation in mechanical properties can be explained by bone density, existing two mechanisms that can explain trabeculae lost; biological and mechanical

overload [32]. There have been described changes in the cartilage morphology of the patella articulation which could be sex specific and related to age, indicating a susceptibility sex specific to degenerative joint disease [24].

The validation test results confirm the reliability of applying these formulae to Spanish population, classifying correctly the 93.3% of the sample using the combination of the maximum height and the maximum width. The best classifying variables were the total volume, the superior volume and the maximum width classifying correctly the 86.7% of the sample.

To verify the need of obtaining classification function population specific the formulae and data of other populations were applied on the study sample used for the validation test. The results show that with the formulae of other population it is possible to classify correctly between the 80% and 86.7% of the sample. These results were expected because although there were differences comparing the mean values of the variables between populations the differences were not highly strong. These results can suggest that the patella has not so many size differences between populations as other bones do. In spite of not having obtained so bad results using other population specific formulae there is no doubt it is better to use classification functions obtained from the same population of the sample study because better classifying results have been obtained.

## **Conclusions**

The patella is a compact bone which is resistant to postmortem changes, could being recovered intact in the archaeological and forensic context. These characteristics make the patella of great interest when other bones typically used to determine sex are not found in a good state of preservation.

The patella is useful to determine sex with reliability, classifying correctly the 86.5% of the sample using the combination of the metric and volumetric variables studied. The volume is a high discriminant variable to determine sex confirming the value to study the sex discriminant power of low or non tested variables. The variables which better classify the sample are the right total volume and the right maximum width classifying correctly the 82.4% of the sample. The combination of the right maximum height and the right maximum width classify correctly the 84% of the sample.

The validation test confirms that the patella can be used to determine sex with reliability classifying correctly the 93.3% of the sample. These results are the best obtained considering

the application of other population formulae confirming, the need of using specific population formulae to determine sex.

**Acknowledgements** We would like to thank the Computer Center of the Complutense University of Madrid for the availability of the Picza 3D Laser scanner and its software. We specially thank Pedro Cuesta Álvaro for the revision of the statistical study.

## References

1. Feneis H (1998) *Nomenclatura anatómica ilustrada*. 3a edición. Masson.
2. Drake RL, Vogl W, Mitchell AWM (2007) *Anatomía para estudiantes*. 1a edición. Gray. Elsevier.
3. Baker BJ, Dupras TL, Tocheri MW (2005) *The osteology of infants and children*. 1<sup>st</sup> edition. Texas A&M.
4. Moore KL, Daley II AR (2007) *Anatomía con orientación clínica*. 5<sup>a</sup> edición. Editorial médica Panamericana.
5. Brothwell DR (1981) *Digging up bones. The excavation, treatment and study of human skeletal remains*. 1<sup>st</sup> edition. British Museum (Natural History), Londres.
6. Iscan MY (2005) Forensic anthropology of sex and body size. *Forensic Sci Int* 147: 107-112.
7. Vriese B (1913) La signification morphologique de la rotule basée sur des recherches anthropologiques. In: *Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris* VI 4(3): 306-369.
8. Gunn MC, McWilliams KR (1980) A method for estimating sex of the human skeleton from the volume of the patella, talus, or calcaneus. *HOMO* 31:189–98.
9. Introna F, Di Vella G, Campobasso CP (1998) Sex determination by discriminant analysis of patella measurements. *Forensic Sci Int* 95: 39-45.
10. AboSamak AMEB, El-Hanafy MMA, Attia MM, Mishriki ES (1999) Identification of sex from patella in egyptians. *Mansoura J. Forensic Med. Clin. Toxicol* 7(2), July.
11. Trinkaus E (2000) Human patellar articular proportions: recent and Pleistocene patterns. *J Anat* 196: 473-483.
12. Kemkes-Grottenthaler A (2005) Sex determination by discriminant analysis: an evaluation of the reliability of patella measurements. *Forensic Sci Int* 147: 129-133.
13. Bidmos MA, Steinberg N, Kuykendall KL (2005) Patella measurements of South African whites as sex assessors. *Homo-Journal of Comparative Human Biology* 56: 69-74.

14. Dayal MR, Bidmos MA (2005) Discriminating sex in South African blacks using patella dimensions. *J Forensic Sci* 50(6).
15. Mahfouz M, Badawi A, Merkl B, Fatah EEA, Pritchard E, Kesler K, Moore M, Jantz R, Jantz L (2007). Patella sex determination by 3D statistical shape models and nonlinear classifiers. *Forensic Sci Int*, doi:10.1016/j.forsciint.2007.02.024.
16. Sakaue K (2008) New method for diagnosis of the sex and age-at-death of an adult human skeleton from patella. *Bull Natl Mus Nat Sci (Ser D)* 34: 43-51.
17. Akhlaghi M, Sheikhezadi A, Naghsh A (2010) Identification of sex in Iranian population using patella dimensions. *Journal of Forensic and Legal Medicine* 17: 150-155.
18. Phoophalee P, Prasitwattanaseree S, Riengrojpitak S (2012) Sex determination by patella measurements in Thais. *Proceedings: 1<sup>st</sup> ASEAN Plus Three Graduate Research Congress*, Chiang Mai, Thailand.
19. Afrianty I, Nasien D, Kadir MRA, Haron H (2013) Determination of gender from pelvic bones and patella in forensic anthropology: A comparison of classification techniques. *First International Conference on Artificial Intelligence, Modelling & Simulation*.
20. Kayalvizhi I, Arora S, Dang B, Bansal S, Narayan RK (2015) Sex determination by applying discriminant functional analysis on patellar morphometry. *International Journal of Science and Research* 4(11).
21. Peckmann TR, Meek S, Dilkie N, Rozendaal A (2016) Determination of sex from the patella in a contemporary Spanish population. *J Forensic Leg Med* 44: 84-91
22. Heegaard J, Leyvraz PF, Curnier A, Rakotomanana L, Huiskes R (1995) The biomechanics of the human patella during passive knee flexion. *J Biomechanics* 28(11): 1265-1279.
23. Miller TT, Staron RB, Feldman F (1996) Patellar height on sagittal MR imaging of the knee. *American Journal of Roentgenology* 167:339-341.
24. Faber SC, Eckstein F, Lukasz S, Mühlbauer R, Hohe J, Englmeier KH, Reiser M (2001) Gender differences in knee joint cartilage thickness, volume and articular surface areas: assessment with quantitative three-dimensional MR imaging. *Skeletal Radiol* 30: 144-150.
25. Biedert RM, Albrecht S (2006) The patellotrochlear index: a new index for assessing patellar height. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 14: 707-712.
26. Fucentese SF, Von Roll A, Koch PP, Epari DR, Fuchs B, Schottle PB (2006) The patella morphology in trochlear dysplasia – A comparative MRI study. *The Knee* 13: 145-150.
27. Iranpour F, Merican AM, Amis AA, Cobb JP (2008) The width: thickness ratio of the patella. *Clin Orthop Relat Res* 466: 1198-1203.



28. Phillips CL, Silver DAT, Schranz PJ, Mandalia V (2010) The measurement of patellar height. A review of the methods of imaging. *J Bone Joint Surg [Br]* 92-B: 1045-53.
29. Olateju OI, Philander I, Bidmos MA (2013) Morphometric analysis of the patella and patellar ligament of South Africans of European ancestry. *South African Journal of Science* 109 (9/10).
30. Ruiz Mediavilla E, Perea Pérez B, Labajo González E, Sánchez Sánchez JA, Santiago Sáez A, Dorado Fernández E (2012) Determining sex by bone volume from 3D images: discriminating analysis of the tali and radii in a contemporary Spanish reference collection. *Int J Legal Med* 126: 623-631.
31. Mediavilla ER, González EL, Pérez BP, Sánchez JAS, Sáez AS, Fernández ED (2016) Determining sex with the clavicle in a contemporary Spanish reference collection: A study on 3D images. *For Sci Int* 261: 163.e1-10. doi: 10.1016/j.forsciint.2016.01.029.
32. Keaveny TM, Yeh OC (2002) Architecture and trabecular bone – Toward and improved understanding of the biomechanical effects of age, sex and osteoporosis. *J Musculoskel Neuron Interact* 2(3): 205-208.
33. Tria AJ, Alicea JA (1995) Embriology and anatomy of the patella in: Scuderi GR (Ed.) *The Patella*, Springer, New York, pp. 1911-1924.

## *6. DISCUSIÓN*

---





Los huesos seleccionados para el presente estudio se escogieron teniendo en cuenta su morfología, tamaño y facilidad de manejo para ser escaneados, intentando seleccionar huesos de diferentes regiones anatómicas del cuerpo para así comparar los diferentes resultados. De esta forma de la extremidad inferior se seleccionaron el astrágalo, que forma parte del pie, y la rótula, que forma parte de la articulación de la rodilla, y de la extremidad superior se seleccionaron el radio, que forma parte del antebrazo, y la clavícula, que forma parte de la cintura escapular.

La digitalización de la muestra permite obtener reproducciones 3D del hueso que pueden ser conservadas indefinidamente y ser estudiadas desde cualquier lugar. El hecho de no haber encontrado diferencias estadísticamente significativas entre las medidas tomadas sobre el hueso seco y las medidas tomadas sobre la imagen 3D confirma la fiabilidad de la toma de medidas sobre las reproducciones 3D. De igual forma el no haber encontrado diferencias estadísticamente significativas entre las dos medidas tomadas sobre la reproducción 3D, incluyendo el cálculo de volumen de las diferentes regiones anatómicas, ni entre los dos observadores confirman la repetibilidad del estudio. Teniendo en cuenta estos resultados quedan cumplidos los objetivos específicos 1, 2 y 3 del estudio.

En los cuatro huesos y para todas las variables se encontraron diferencias estadísticamente significativas según el sexo con lo que se procedió a realizar el análisis discriminante de la muestra, obteniendo tanto funciones como intervalos de clasificación que pueden ser aplicados sobre población española, conociendo por tanto el poder discriminante de cada una de las variables y quedando de esta forma cumplidos los objetivos específicos 4 y 5 del estudio. Ya que los resultados se presentan teniendo en cuenta el lado del hueso se ha podido comprobar si había diferencias según el lado cumpliendo de esta forma con el objetivo específico 6 del estudio. Finalmente se comprobó que las fórmulas de clasificación obtenidas se podían aplicar sobre población española de una forma fiable ya que se obtuvieron buenos resultados en las pruebas de validación aplicadas sobre la muestra seleccionada, quedando por lo tanto cumplido el último objetivo específico del estudio. Los resultados obtenidos para cada uno de los huesos se discuten a continuación.

### *Astrágalo*

En el astrágalo los mejores resultados de clasificación se han conseguido con el volumen total alcanzando un porcentaje del 90.9% con el astrágalo izquierdo. En cuanto al volumen

calculado en las diferentes regiones anatómicas se obtuvieron mejores resultados de clasificación con el volumen de la región posterior, alcanzando casi el 90% de clasificados correctamente. En los casos en los que el hueso se encuentra incompleto y estas regiones están bien conservadas resultaría útil recurrir a estas funciones de clasificación para determinar el sexo.

En cuanto a la variable volumen el astrágalo presenta poca asimetría según el lado siendo los porcentajes de correctamente clasificados ligeramente superiores en el astrágalo izquierdo. En los estudios métricos publicados sobre diferentes poblaciones se discute que el astrágalo muestra poca asimetría en cuanto al lado, contrastando este hecho con la asimetría descrita en los huesos largos de la extremidad inferior donde el miembro izquierdo tendría valores superiores al derecho ya que transmitiría más peso durante la marcha [50]. De ser así se esperaría encontrar también asimetría en los astrágalos ya que si la transmisión de cargas es mayor en uno de los dos miembros el astrágalo se vería afectado por su papel de hueso distribuidor de fuerzas, hecho que no parece ocurrir ya que los diferentes estudios sobre astrágalo, incluido el presente, coinciden en la poca asimetría de este hueso.

Los resultados de las pruebas de validación confirman el poder discriminante de la variable volumen llegando a clasificar correctamente el 90% de la muestra.

### *Radio*

En el radio el volumen de la diáfisis es el que presenta un mayor poder discriminante llegando a clasificar correctamente el 96.9% de la muestra con el radio derecho. La siguiente variable que mejor ha clasificado la muestra ha sido el volumen de la extremidad distal logrando un porcentaje de correcta clasificación del 95.5%. El volumen total ha mostrado también un alto poder discriminante siendo el volumen de la cabeza del radio el que ha alcanzado los porcentajes más bajos de clasificación.

En cuanto a las diferencias según el lado el radio muestra una asimetría marcada, siendo los valores medios de las variables superiores en el lado derecho y obteniendo mejores resultados de clasificación con las funciones discriminantes del radio derecho. En estudios realizados sobre diferentes poblaciones teniendo en cuenta variables métricas se ha descrito la marcada asimetría en el miembro superior habiendo encontrado diferencias marcadas en el radio para las diferentes medidas de longitud, anchuras y circunferencia, habiendo destacado en mujeres

las diferencias en longitud y en varones las de anchura y circunferencia [51].

De igual forma los resultados obtenidos en la prueba de validación confirman el poder discriminante de la variable volumen llegando a clasificar correctamente el 95% de la muestra.

### *Clavícula*

La clavícula presenta casi tan buenos resultados de clasificación como el radio. En cuanto al volumen, la región proximal y distal de la clavícula ofrecen resultados similares a la hora de determinar el sexo, siendo la diáfisis la que ofrece los mejores resultados, clasificando correctamente el 94% de la muestra con la clavícula derecha. De igual forma el volumen total ha mostrado un alto poder discriminante clasificando correctamente el 92% de la muestra. En cuanto a las variables métricas también los dos diámetros medidos en el punto medio de la diáfisis discriminan mejor el sexo que el resto de las variables medidas en los extremos, siendo la más dimórfica el diámetro sagital de la diáfisis.

La diáfisis parece tener un mayor dimorfismo sexual que las regiones distal y proximal, tanto en hombres como en mujeres. Es curioso que en varones no se hayan encontrado diferencias estadísticamente significativas según el lado para el volumen de la diáfisis pero sí en cambio para los diámetros medidos en el punto medio de la diáfisis con lo que parece que las diferencias se centran en esa región central, diferencias que no se llegan a apreciar valorando el volumen total de la diáfisis. La acción de los músculos de las regiones proximal y distal estaría influenciando en la morfología de la curva y añadiría tensión a esa porción medial fomentando su remodelación e incrementando su robustez en respuesta a este estrés [36], lo que explicaría las diferencias de lado encontradas en esta región central, siendo este estrés más marcado en el miembro dominante. Tanto los estudios métricos como volumétricos coinciden en que la diáfisis parece presentar más diferencias en cuanto al sexo con lo que esta región discrimina mejor el sexo que los extremos, habiendo obtenido mejores resultados con el volumen que con las variables métricas.

La clavícula, al igual que el radio, muestra una mayor asimetría, encontrando diferencias para todas las variables a excepción de las variables métricas medidas en el extremo distal y el volumen total derecho en varones. Todas las medidas son mayores en el lateral derecho a excepción de la longitud máxima. La asimetría descrita en la clavícula podría ser debida a

diferencias en los patrones de actividad y del comportamiento de las cargas de rodamiento, siendo los diámetros medidos en la diáfisis más sensibles a las cargas de rodamiento que la longitud [52]. Los estudios en fetos muestran que no hay variaciones en cuanto a la lateralidad y en cuanto a su crecimiento intrauterino parece que este es un fenómeno prácticamente simétrico, con lo que las diferencias bilaterales aparecerían después del nacimiento [53].

Tanto las variables métricas como volumétricas son mayores en el lateral derecho, con la excepción de la longitud máxima y el diámetro sagital en el extremo distal en varones, siendo las diferencias no estadísticamente significativas en este último caso. Las diferencias según el lado encontradas en las medidas métricas del extremo distal no son estadísticamente significativas, contrastando este resultado con el obtenido con el volumen distal cuyas diferencias sí son estadísticamente significativas según el lado. Esto podría indicar que el dimorfismo que muestra el extremo distal es más marcado en otros puntos, no en los medidos por las variables métricas.

Los resultados obtenidos en estudios anteriores y en el presente parecen confirmar que la clavícula izquierda tiene una mayor longitud que la derecha pero que esta última es más robusta. La clavícula actúa como un soporte de unión y transmite de forma axial fuerzas desde la extremidad superior al tórax. La razón por la que las clavículas derechas son más cortas podría estar relacionado con un incremento de las fuerzas de compresión sobre la cintura escapular del miembro dominante [54] lo que podía incrementar la curvatura, aproximando los dos extremos y provocando una unión temprana de las epífisis al hueso [55]. A estas diferencias de lado también se podrían sumar las que hay a nivel de desarrollo muscular debido a la predominancia de un miembro sobre otro o la tendencia a favorecer el uso de uno de los dos miembros en las tareas diarias [56]. De igual forma un desarrollo asimétrico de las áreas donde se unen los ligamentos costoclavicular y trapezoide podría contribuir a las diferencias de lado. Se ha descrito que aquellas clavículas que sufren una mayor tensión en estos ligamentos tienden a ser el lado más corto [54].

En estudios realizados sobre otras poblaciones se han conseguido porcentajes de correcta clasificación que varían entre el 85 y el 93% utilizando la longitud máxima. Si se aplican las cortes de clasificación de las anteriores poblaciones sobre población española los porcentajes de correcta clasificación varían del 69 al 85%, confirmando la necesidad de obtener funciones

de clasificación específicas de población. En cuanto al volumen la única población sobre la que se estudió el poder discriminante de la variable volumen fue una población India, estudiada por Sing et Jit (1996) en la que calculó el volumen de la clavícula mediante desplazamiento de fluido, siendo los valores medios mayores en población española, al igual que ocurre con las variables métricas [32].

Los resultados de las pruebas de validación confirman el poder discriminante de la variable volumen llegando a clasificar correctamente el 100% de la muestra con el volumen total y el volumen de la diáfisis.

### *Rótula*

La rótula es considerada uno de los huesos más olvidados en Antropología Forense a pesar de tener una gran supervivencia en el contexto arqueológico [57] pudiéndose recuperar muchas veces intacta debido a su naturaleza compacta [58]. En cuanto a su dimorfismo sexual sería razonable pensar que resultaría útil ya que juega un papel importante en la articulación de la rodilla, en la cual participan también el fémur y la tibia, siendo estos altamente dimórficos [59]. En cuanto a las diferencias encontradas entre varones y mujeres estas podrían deberse, entre otras, a que el complejo muscular del varón es mayor que el de la mujer [60] y que las diferencias encontradas en cuanto a la forma y el tamaño podrían verse influenciadas y alteradas por la fuerza de esa masa muscular [58].

Las variables de la rótula que mejor discriminaron la muestra fueron el volumen total derecho y la anchura máxima derecha. La combinación de la altura máxima derecha y la anchura máxima mejoró ligeramente los resultados. Los diferentes estudios en otras poblaciones tienen en común que la combinación de variables en el análisis discriminante ofrece mejores resultados que las variables aisladas. Las variables más dimórficas han variado según la población de estudio pero las más comunes han sido la altura máxima y la anchura máxima.

En cuanto a las diferencias de lado, estudios anteriores revelan que pocas diferencias se han encontrado entre rótulas derechas e izquierdas, confirmando este hecho en la presente muestra de estudio donde de las once variables estudiadas solo se encontraron diferencias según el lado para la anchura de la faceta lateral y el volumen medial, en varones, y para el volumen lateral tanto en varones como en mujeres.



En cuanto a las diferencias en el tamaño de las facetas lateral y medial, salvo alguna excepción, la faceta lateral presenta un mayor tamaño que la medial [57] siendo esta la tendencia descrita en los estudios publicados sobre otras poblaciones y también en la presente muestra de estudio. En este caso no se puede establecer ninguna relación entre las medidas métricas y volumétricas calculadas en estas regiones ya que el punto de corte para el cálculo del volumen no viene establecido por la separación de ambas facetas sino por los puntos que marcan la altura máxima de la rótula.

En estudios realizados sobre otras poblaciones se han conseguido porcentajes de correcta clasificación con variables métricas que varían del 83.5% al 95.2%. En este caso la aplicación de las fórmulas discriminantes o cortes de las otras poblaciones sobre la presente muestra de estudio no arrojó tan malos resultados como en el caso de la clavícula ya que se consiguió clasificar correctamente entre el 80% y el 86.7% de la muestra, lo cual era de esperar ya que no se encontraron diferencias muy marcadas entre los valores de las variables. Estos resultados sugieren que la rótula no presenta tantas diferencias entre poblaciones como lo hacen otros huesos, sin olvidar que se trata de un hueso sesamoideo.

La única población con la que se pudieron comparar los resultados obtenidos con el volumen fue la población de Thai la cual mostró valores similares para el volumen en varones (15.8 cm<sup>3</sup> en la muestra española y 15.38 cm<sup>3</sup> en la población de Thai) pero inferiores para las mujeres (11.6 cm<sup>3</sup> en la muestra española y 10.79 cm<sup>3</sup> en la población de Thai), teniendo en cuenta que para el cálculo de volumen utilizaron la técnica de desplazamiento de fluido. De estos resultados se deduce que esta población presenta un mayor dimorfismo sexual que la española ya que las diferencias entre sexos son mayores llegando a clasificar el 90,5% de su muestra combinando todas sus variables de estudio.

A pesar de que la rótula es la que menor dimorfismo sexual ha presentado de los cuatro huesos objeto de estudio, las pruebas de validación confirman el poder discriminante de la variable volumen llegando a clasificar correctamente el 86.67% de la muestra. La combinación de la altura máxima y la anchura máxima llegó a clasificar correctamente el 93.3% de la muestra.

Teniendo en cuenta el conjunto de resultados se ha conseguido el objetivo principal de la presente tesis que era analizar el poder discriminante de la variable volumen en hueso para determinar el sexo y ofrecer funciones de clasificación que puedan ser aplicadas sobre población española. Los resultados obtenidos muestran un alto poder discriminante de las variables volumétricas estudiadas en cada uno de los huesos con lo que se puede discriminar el sexo del individuo a través de variables volumétricas de una forma fiable, habiendo obtenido mejores resultados con los huesos de la extremidad superior; radio y clavícula.

En cuanto a la hipótesis inicial de que el análisis volumétrico digital en hueso es más discriminante en cuanto al sexo que las medidas lineales, este hecho se confirma en el caso de las clavículas donde se han obtenido mejores resultados de clasificación en cuanto al sexo con las variables volumétricas. En el caso de la rótula el máximo porcentaje de clasificación se ha alcanzado tanto con una variable volumétrica como una métrica.

Los resultados ofrecidos en la presente tesis aportan información acerca del poder discriminante de la variable volumen, del cual apenas existen publicaciones y en las cuales el volumen no se ha calculado de forma exacta, ofreciendo además por primera vez funciones de clasificación para población española. En cuanto a la aplicabilidad de este método en los laboratorios hay que tener en cuenta que es necesario disponer de un escáner 3D lo cual no siempre es posible. La inversión en su adquisición al igual que el tiempo necesario para realizar una reproducción digital del hueso se vería recompensado por la posibilidad de poder guardar una reproducción digital del hueso que se pueda consultar y recuperar en cualquier momento lo cual tiene un valor incalculable. Suele ocurrir que aunque se intenten mantener todas las condiciones para favorecer la conservación de los huesos esto no es posible. En ocasiones las colecciones osteológicas están destinadas al aprendizaje con lo que su uso continuado hace que su deterioro sea inevitable. Muchos de los restos objeto de estudio es posible que no se puedan almacenar ya que tienen que ser devueltos bien porque se trate de un caso judicial bien porque su destino final sea otro depósito con lo que tenerlos digitalizados podría permitir su estudio posterior de una forma rápida en el caso que se hubieran de revisar resultados, hacer nuevos estudios o realizar consultas.



## 7. CONCLUSIONES





1. Es posible digitalizar un hueso y reproducirlo de forma fiable. Se debe prestar atención a la selección de parámetros y al procesamiento de la imagen en todas sus etapas, siendo exigentes en los mismos para que el proceso se lleve a cabo con éxito.

2. Es posible calcular variables métricas y volumétricas sobre el hueso digitalizado de una forma fiable. Se debe prestar atención tanto al posicionar las líneas de corte cuando se pretende calcular el volumen de una determinada región anatómica como al posicionar los dos puntos cuando se quiere calcular una variable métrica.

3. La muestra de estudio presenta diferencias estadísticamente significativas según el sexo para todas las variables estudiadas, siendo los valores mayores en el sexo masculino.

**Con respecto al astrágalo:**

4. La variable volumen total es la que presenta un mayor poder discriminante para determinar el sexo en la presente muestra de estudio clasificando correctamente el 90.9% de los casos con el astrágalo izquierdo.

5. No ha presentado diferencias estadísticamente significativas en cuanto al lado obteniendo mejores resultados de clasificación con el astrágalo izquierdo en la mayoría de las variables.

**Con respecto al radio:**

6. La variable volumen total tiene un alto poder discriminante para determinar el sexo en la presente muestra de estudio clasificando correctamente el 93.9% de los casos con el radio derecho.

7. La variable volumen de la diáfisis es la variable que presenta el mayor poder discriminante para determinar el sexo clasificando correctamente el 96.9% de la muestra con el radio derecho, seguida de la variable volumen del extremo distal que clasifica correctamente el 95.5% de la muestra con el radio derecho.

8. Se han encontrado diferencias estadísticamente significativas según el lado, siendo el valor de las variables mayor en el lateral derecho y obteniendo mejores resultados de clasificación con este lado.

**Con respecto a la clavícula:**

9. La variable volumen total tiene un alto poder discriminante para determinar el sexo en la presente muestra de estudio clasificando correctamente el 92% de los casos con la clavícula derecha.

10. La variable volumen de la diáfisis es la variable que presenta el mayor poder discriminante para determinar el sexo clasificando correctamente el 94% de la muestra con la clavícula derecha.

11. Se han encontrado diferencias estadísticamente significativas según el lado, siendo el valor de las variables mayor en el lateral derecho, a excepción de la longitud máxima.

**Con respecto a la rótula:**

12. La variable volumen total y la anchura máxima son las variables que presentan el mayor poder discriminante para determinar el sexo en la presente muestra de estudio clasificando correctamente el 82.4% de los casos con la rótula derecha.

13. No ha presentado diferencias estadísticamente significativas en cuanto al lado obteniendo mejores resultados de clasificación con la rótula derecha en la mayoría de las variables.

14. Las pruebas de validación confirman los resultados obtenidos en el análisis discriminante pudiendo aplicar las fórmulas obtenidas sobre población española de forma fiable.

15. Los resultados obtenidos ofrecen un motivo para continuar investigando el poder discriminante de la variable volumen en otros huesos del esqueleto postcraneal ya que su poder discriminante es alto y en clavícula ha superado los resultados obtenidos con variables métricas.

16. El hecho de haber escaneado en tres dimensiones toda la muestra de estudio permite la creación de una biblioteca digital donde quedan almacenadas las reproducciones 3D que podrían ser utilizadas para estudios posteriores.

## 8. BIBLIOGRAFÍA







- [1] Pickering RB., Bachman DC. 1997. The Use of Forensic Anthropology. CRC Press.
- [2] Afrianty I, Nasien D, Kadir MRA, Haron H (2013) Determination of gender from pelvic bones and patella in forensic anthropology: A comparison of classification techniques. First International Conference on Artificial Intelligence, Modelling & Simulation.
- [3] Ubelaker DH (1999) Human Skeletal Remains: Excavation, Analysis, Interpretation. Aldine Manuals on Archaeology. 3<sup>rd</sup> ed. Washington, DC: Taraxacum.
- [4] Brothwell DR (1981) Digging up bones. The excavation, treatment and study of human skeletal remains. 1<sup>st</sup> edition. British Museum (Natural History), Londres.
- [5] Krogman WM, Iscan MY. 1986. The Human Skeleton in Forensic Medicine. 2<sup>nd</sup> Edition. Charles C Thomas Publisher. Springfield, Illinois, USA.
- [6] Núñez-Samper M, Llanos LF (1997) Biomecánica, medicina y cirugía del pie. Editorial Masson.
- [7] Baker BJ, Dupras TL, Tocheri MW (2005) The osteology of infants and children. 1<sup>st</sup> edition. Texas A&M.
- [8] White T, Black M, Folkens P (2011) Human Osteology. 3<sup>rd</sup> Edition, Academic Press.
- [9] Martin R (1928) Lehrbuch der Anthropologie in Sstematischer Darstellung mit Besonderer Berücksichtigung der anthropologischen Methoden für Studierende, Ärzte und Forschungsreisende. Jena, Germany: Gustav Fischer.
- [10] Steele DG (1976) The estimation of sex on the basis of the talus and calcaneus. American Journal of Physical Anthropology 45:581-588.
- [11] Castellana C, Malgosa A, Subirà ME, Carrasco T (1988) Estudio osteométrico de los astrágalos de "S'Illot des Porros", Mallorca, VI-II AC. Boletín de la Sociedad española de Antropología Biológica 9:43-53.
- [12] Palacio P (1995) Biometría del astrágalo. Tesis doctoral. Director: Javier Fernández Camacho. Universidad Alcalá de Henares.
- [13] Gualdi-Russo E (2007) Sex determination from the talus and calcaneus measurements. Forensic Sci Int 171:151-156.
- [14] Mahakkanukrauh P, Praneatpolgrang S, Ruengdit S, Singsuwan P, Duangto P (2014) Sex estimation from the talus in a thai population. Forensic Sci Int 240:152.e1-158.

- [15] Bidmos MA, Dayal MR (2003) Sex determination from the talus of South African whites by discriminant function analysis. *Am. J. Forensic Med. Pathol* 24: 322-328.
- [16] Bidmos MA, Dayal MR (2004) Further evidence to show population specificity of discriminant function equations for sex determination using the talus of South African blacks. *J. Forensic Sci* 4: 1165-1170.
- [17] Lee U, Han S, Park D, Kim Y, Kim D, Chung I, Chun M (2012) Sex determination from the talus of Koreans by discriminant analysis. *J Forensic Sci* 57:166-171.
- [18] Berrizbeitia EL (1989) Sex determination with the head of the radius. *J Forensic Sci* 34(5):1206-13.
- [19] Barrier EL, L'Abbé EN (2008) Sex determination from the radius and ulna in a modern South African sample. *Forensic Sci Int* 179(1):85.e1-7.
- [20] Allen JC, Bruce MF, MacLaughlin SM (1987) Sex determination from the radius in humans. *Human Evolution* 2(4): 373-378.
- [21] Charisi D, Eliopoulos C, Vann V, Koiliass CG, Manolis SK (2011) Sexual dimorphism of the arm bones in a modern Greek population. *Forensic Sci Int* 56(1):10-18.
- [22] Kranioti EF, Tzanakis N (2015) Estimation of Sex from the Upper Limb in Modern Cretans with the Aid of ROC-Analysis: A Technical Report. *Forensic Res Criminol Int J* 1(2):00008. DOI: 10.15406/frcij.2015.01.00008.
- [23] Sakaue K (2004) Sexual determination of long bones in recent Japanese. *Anthropol Sci* 112(1):75-81.
- [24] Tersigni-Tarrant MA, Shirley N. 2013. *Human Osteology in Forensic Anthropology An Introduction*. Chapter 4. 33-67. CRC Press Taylor & Francis Group.
- [25] Jit I, Singh S (1966) The sexing of the adult clavicles. *Indian J. Med. Res.* 54(6): 551-571.
- [26] Patel JP, Shah RK, Merchant SP, Nirvan AB, Shah GV (2009) Sexing of the human adult clavicle in Gujarat zone. *Gujarat Medical Journal* 64(2): 40-46.
- [27] Ríos Frutos L (2002) Determination of Sex from the Clavicle and Scapula in a Guatemalan Contemporary Rural Indigenous Population. *Am. J. Forensic Med. Path.* 23(3): 284-288.
- [28] Haque MK, Mansur DI, Krishnamurthy A, Karki R, Sharma K, Shakya R (2011) Morpho metric Analysis of Clavicle in Nepalese Population. *Kathmandu Univ. Med. J.* 9(3) 35: 193-197.
- [29] Papaioannou VA, Kranioti EF, Joveneaux P, Nathana D, Michalodimitrakakis M (2012)

Sexual dimorphism of the scapula and the clavicle in a contemporary Greek population: Applications in forensic identification. *Forensic Sci. Int.* 217:231.e1-231.e7.

[30] Akhlaghi M, Moradi B, Hajibeygi M (2012) Sex determination using anthropometric dimensions of the clavicle in Iranian population. *J. Forensic Leg. Med.* 19: 381-385.

[31] Shobha, Math SC, Jatti VB, Murthy CRV (2014) Identification of Sex of Human Clavicles from North Karnataka Zone. *Anthropologist* 17(3): 917-920.

[32] Singh D, Jit I (1996) Identification of sex from the volume of the clavicle. *J. Anat. Soc. India* 45(2): 119-124.

[33] Gunn MC, McWilliams KR (1980) A method for estimating sex of the human skeleton from the volume of the patella, talus, or calcaneus. *HOMO* 31:189–98.

[34] Introna F, Di Vella G, Campobasso CP (1998) Sex determination by discriminant analysis of patella measurements. *Forensic Sci Int* 95: 39-45.

[35] AboSamak AMEB, El-Hanafy MMA, Attia MM, Mishriki ES (1999) Identification of sex from patella in Egyptians. *Mansoura J. Forensic Med. Clin. Toxicol* 7(2), July.

[36] Kemkes-Grottenthaler A (2005) Sex determination by discriminant analysis: an evaluation of the reliability of patella measurements. *Forensic Sci Int* 147: 129-133.

[37] Bidmos MA, Steinberg N, Kuykendall KL (2005) Patella measurements of South African whites as sex assessors. *Homo-Journal of Comparative Human Biology* 56: 69-74.

[38] Dayal MR, Bidmos MA (2005) Discriminating sex in South African blacks using patella dimensions. *J Forensic Sci* 50(6).

[39] Mahfouz M, Badawi A, Merkl B, Fatah EEA, Pritchard E, Kesler K, Moore M, Jantz R, Jantz L (2007). Patella sex determination by 3D statistical shape models and nonlinear classifiers. *Forensic Sci Int*, doi:10.1016/j.forsciint.2007.02.024.

[40] Sakaue K (2008) New method for diagnosis of the sex and age-at-death of an adult human skeleton from patella. *Bull Natl Mus Nat Sci (Ser D)* 34: 43-51.

[41] Akhlaghi M, Sheikhezadi A, Naghsh A (2010) Identification of sex in Iranian population using patella dimensions. *Journal of Forensic and Legal Medicine* 17: 150-155.

[42] Phoophalee P, Prasitwattanaseree S, Riengrojpitak S (2012) Sex determination by patella measurements in Thais. *Proceedings: 1<sup>st</sup> ASEAN Plus Three Graduate Research Congress*, Chiang Mai, Thailand.

[43] Afrianty I, Nasien D, Kadir MRA, Haron H (2013) Determination of gender from pelvic bones and patella in forensic anthropology: A comparison of classification techniques. *First International Conference on Artificial Intelligence, Modelling & Simulation*.

[44] Kayalvizhi I, Arora S, Dang B, Bansal S, Narayan RK (2015) Sex determination by

applying discriminant functional analysis on patellar morphometry. *International Journal of Science and Research* 4(11).

[45] Peckmann TR, Meek S, Dilkie N, Rozendaal A (2016) Determination of sex from the patella in a contemporary Spanish population. *J Forensic Leg Med* 44: 84-91.

[46] Manual del usuario LPX-250 PICZA 3D Laser scanner. Roland DG Corporation.

[47] Pietrusewsky M. 2000. Metric Analysis of Skeletal Remains: Methods and Applications. In *Biological Anthropology of the Human Skeleton*. Katzenberg MA, Saunders SR Editors. Wiley-Liss. Chapter 14: 375-415.

[48] Klepinger LL (2006) *Fundamentals of Forensic Anthropology*. Matt Cartmill and Kaye Brown, Series Editors. Wiley-Liss.

[49] Iscan MY, Loth SR (1997) The Scope of Forensic Anthropology. In *Introduction to Forensic Sciences*. 2<sup>nd</sup> Edition. Eckert WG Editor. CRC Press. Chapter 13: 343-369.

[50] Singh M, Nagrath AR, Maini PS (1970) Changes in trabecular pattern of the upper end of the femur as an index of osteoporosis. *Journal of Bone and Joint Surgery* 52A:457-467.

[51] Waidhofer M, Kirchengast S (2015) Sexual dimorphism in directional asymmetry of the upper limb bones among Khoe-San skeletons. *Homo – Journal of comparative Human Biology* 66: 508-519.

[52] Auerbach BM, Raxter MH (2008) Patterns of clavicular bilateral asymmetry in relation to the humerus: variation among humans. *J. Hum. Evol.* 54:663-674.

[53] Mohsin A, Alam Z, Ekramuddin, Faruqi NA (2013) Bilateral variations in the growth and development of human foetal clavicle. *Biomed. Res.* 24(2):235-241.

[54] Mays S, Steele J, Ford M (1999) Directional asymmetry in the human clavicle. *Int. J. Osteoarchaeol.* 9:18-28.

[55] Parsons FG (1916) On the proportions and characteristics of the modern English clavicle. *J. Anat.* 51:71-93.

[56] Shaw CN (2011) Is “hand preference” coded in the hominin skeleton? An in-vivo study of bilateral morphological variation. *J. Hum. Evol.* 61:480-487.12.

[57] Kemkes-Grottenthaler A (2005) Sex determination by discriminant analysis: an evaluation of the reliability of patella measurements. *Forensic Sci Int* 147: 129-133.

[58] Dayal MR, Bidmos MA (2005) Discriminating sex in South African blacks using patella dimensions. *J Forensic Sci* 50(6).

[59] Iscan MY (2005) Forensic anthropology of sex and body size. *Forensic Sci Int* 147: 107-112.

[60] Kayalvizhi I, Arora S, Dang B, Bansal S, Narayan RK (2015) Sex determination by

applying discriminant functional analysis on patellar morphometry. International Journal of Science and Research 4(11).